

ISSN 1813-5420

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№ 3 – 2015

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 3 (41) - 2015

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Засновник
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Міжфакультетський журнал

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Теплоенергетичний факультет

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Київ
НТУУ «КПІ»
2015

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

головного редактора – С.П. Денисюк, О.С. Яндульський, Є.М. Письменний

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: Б.І. Басок, В.І. Дешко, В.Я. Жуйков,
(Україна) Л.О. Кесова, М.В. Костерев, С.О. Кудря,
В.Ф. Находов, М.Я. Островерхов, С.М. Пересада,
К.К. Ткачук, Н.М. Фіалко, О.Ю. Черноусенко,
С.П. Шевчук, В.Ф. Шинкаренко, В.О. Туз

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард Стржелецкі (*Інститут електротехніки, Варшава, Польща*), П.Я. Екель (*Папський католицький університет Мінас Жерайс, Бразилія*), Димитрос Мавракіс (*Національний університет м. Афіни, Греція*), А.В. Кузнецов (*Університет штату Північна Кароліна, США*)

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

Веб-сайт журналу <http://energy.kpi.ua>

Журнал зареєстровано Реєстраційний номер свідоцтва про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 4135 від 30.03.2000р.

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до Постанови Президії ВАК України від 1 липня 2010р. № 1-05/5. Журнал включено до наукометричної бази даних РІНЦ, бази даних «Наукова періодика України», Google Scholar. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (протокол № 10 від 07 грудня 2015 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Адміністрування сайту О.О. Закладний.

Комп'ютерна верстка П.О. Замковий. Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Адреса редакції 03056, Україна, м.Київ, вул.Борщагівська, 115, к.315,
тел. (38-044) 406-85-14, e-mail: krav@iee.kpi.ua

Видавець НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка»,
м.Київ, вул. Політехнічна , 14, корп. 15.

Увага! Передрукування матеріалів іншими виданнями можливе лише з дозволу редакційної колегії журналу **ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія**

©НТУУ «КПІ», 2015

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE
"KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE"

POWER
ENGINEERING
economics, technique, ecology

ENERHETYKA:

ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 3 (41) - 2015

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Founder

National Technical University of Ukraine
«Kyiv Polytechnic Institute»

Inter-faculty journal

Institute for Energy Saving and Energy Management

Heat-and-Power Engineering Department

Electrical Technology and Automation Department

Kyiv

NTUU «KPI»

2015

Editor-in-chief- Yu.I. Yakimenko
Deputy editors-in-chief- S.P. Denysiuk, O.S. Yandulskiy, E.M. Pysmennyi
Deputy O.A. Zakladnyi
EDITORIAL BOARD: B.I. Basok, V.I. Deshko, V.Ya. Zhuykov,
(Ukraine) L.O. Kesova, M.V. Kosteriev S.O. Kudrya,
V.F. Nahodov, M.Ya. Ostroverkhov, S.M. Peresada,
K.K. Tkachuk, N.M. Fialko, O. Yu. Chernousenko
S.P. Shevchuk, V.F. Shinkarenko, V.O. Tuz

FOREIGN MEMBERS OF
EDITORIAL BOARD:

E. Handschin (*Institute of Power Systems and Power Economics of Dortmund Technical University, Germany*),
Richard Strzelecki (*Electro technical Institute, Warsaw, Poland*),
P.Y. Ekel (*Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil*),
Dimitros Mavrakis (*University of Athens, Greece*),
A.V. Kuznetsov (*North Caroline State University, USA*)

Technical secretary N.O. Kravchuk
Website of the journal <http://energy.kpi.ua>
Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media
series KB №4135 dated 30 March 2000

The Journal was registered by HAK of Ukraine as an occupational edition. Resolution of HAK of Ukraine dated 1 July 2010 № 1-05/5. The Journal is included in scientometric database RSCI, databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" (protocol № 10 on December 7, 2015).

Proofreading V.G. Smoliar. Web site administration O.A. Zakladnyi.
Desktop publishing P.O. Zamkoviy. Responsible for the publication N.O. Kravchuk.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Address of editorial office 03056, Ukraine, Kyiv, 115 Borschagivska str., office 315
tel. (38-044) 406-85-14, e-mail: krav@iee.kpi.ua

The publisher NTUU "KPI" IPP PPC "Politehnika",
Kyiv, 14 Polytechnique str., b. 15.

Attention! Reprint material in other publications only with the permission of editorial board of the journal **POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology**

©NTUU «KPI», 2015

ЗМІСТ

ТЕХНОЛОГІЇ

П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ.....	7
Г.І. Канюк, І.А. Бабенко, А.Ю. Мезеря, І.П. Лаптинов, В.Н. Князева. Резерви енергосбереження при автоматизованому управлінні центробежними насосами електростанцій	13
А.В. Волошко. Класифікація інформаційних сигналів за відносною ентропією по рівням вейвлет-декомпозиції.....	20
О.Ф. Буткевич, В.В. Чижевський. Деякі питання побудови інтегрованої системи запобігання коливному порушенню стійкості об'єднаної енергосистеми.....	28
В.А. Єрошенко, А.В. Тишковець, В.О. Бублей. Про можливість використання циклу Єрошенка як альтернатива циклу Ренкіна в енергетиці.....	37
Ю.П. Матеєнко, С.В. Казанский, А.С. Лунин. Расчет надежности структурных схем электрических станций в условиях функционирования рынка электрической энергии.....	49
В.П. Розен, Л.Я. Кулаковський. Побудова нейронної мережі моделі процесу сушіння торфу в парових сушарках в енергозберігаючих режимах.....	55
І.Г. Яковлева, А.С. Мних. Вибір раціонального розподілу твердого палива у шарі бокситової шихти на основі моделі теплового режиму спікання.....	59
Д.А. Долматов, Масуд Хаджіванд. RANS моделювання геометрії вікон підведення повітря в камері згоряння газотурбінного двигуна та її впливу на емісійні характеристики.....	67
Ю.Г. Качан, В.Л. Коваленко, О.І. Лапікова. Аналіз ефективності та перспектив розвитку біогазової енергетики.....	79
О.В. Коцар, Д.К. Ткаченко. Керування даними обліку в умовах запровадження в Україні лібералізованого ринку електричної енергії.....	84
О. Л. Котляров. Засоби підтримки прийняття рішень при модернізації нафтогазових промислів....	93
А. М. Ковальчук, Д. В. Сусюк. Підвищення ефективності використання твердого палива за рахунок генератора воднево-кисневого газу.....	98
О.Л. Радченко. Розрахунок комплексу «відновлюване джерело – акумулятор» з максимальним використанням генерованої енергії.....	102
Д. В. Міронов. Удосконалення системи ТО і Р обладнання тягових підстанцій з використанням узагальнених критеріїв.....	107
ЕКОНОМІКА	
М.Т. Стрелков. Статична модель складу системи ринку електричної енергії.....	117
ЕКОЛОГІЯ	
О.О. Вовк. Стратегії зниження екологічного впливу на техносферу.....	124
Основні засади редакційної політики.....	128
Вимоги до оформлення статей.....	129

CONTENTS

TECHNIQUE

P.D. Lezhnyuk, A.E. Rubanenko, I.A. Gunko. The influence of solar power plants on voltage of 0.4 kV consumers.....	7
G. Kaniuk, I. Babenko, A. Mezerya, I. Laptinov, V. Knyazeva. Energy save from automatic regulation centrifugal pump in power plant station.....	13
A.V. Voloshko. Classification of information signals relative entropy of the levels of wavelet decomposition	20
O. Butkevych, V. Chyzhevskiy. Some problems of integrated system construction for prevention of interconnected power system's oscillatory instability.....	28
V.A. Eroshenko, A.V. Tyshkovets, V.O. Bublei. About the possibility of using cycle Eroshenko like alternatively Rankine cycle in the power industry.....	37
Y. Mateyenko, S. Kazanskiy, A. Lunin. Reliability calculation of block schemes of electric power plants in terms of functioning of electricity market.....	49
V.P. Rosen, L Ya. Kulakovskiy. Construction of neural network model of peat drying in steam drying in energy-saving regimes.....	55
I.G. Yakovleva, A.S. Mnyh. The application of model of bauxite charge sintering thermal regime to determine the optimum distribution of solid fuels.....	59
D.A Dolmatov, Masoud Hajivand. RANS simulation of effect of air admission's holes geometry in a gas turbine combustor and their effects on emission characteristics.....	67
Y.G. Kachan, V.L. Kovalenko, O.I. Lapikova. Analysis of efficiency and development prospect of biogas energetic.....	79
O. Kotsar, D. Tkachenko. Metering data management are in the conditions of introduction in Ukraine the liberalized electricity market.....	84
O.L. Kotlyarov. Tools of decision making support for the modernization of oil fields.....	93
A.M. Kovalchuk, D.V. Susiuk. Increasing efficiency of using the solid fuel by a hydrogen-oxygen gas generator.....	98
O.L. Radchenko. Calculation of complex "renewable energy source - battery" with maximum use of the energy generated.....	102
D.V. Mironov. Improvement the system of maintenance service and repair for traction substations equipment using the generalized criteria.....	107
ECONOMY	
M.T. Strelkov. Static model of electricity market system composition.....	117
ECOLOGY	
O.O.Vovk. Strategies for environmental impact reduction on technospere.....	124

ТЕХНОЛОГІЇ TECHNIQUE

УДК621.316.1:313.322

П. Д. Лежнюк, д-р техн. наук, професор, О. Є. Рубаненко, канд. техн. наук, доцент, І. О. Гунько
Вінницький національний технічний університет

ВПЛИВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ НА НАПРУГУ СПОЖИВАЧІВ 0,4 КВ

В наш час багатьох країнах світу використовують альтернативні види енергії. В експлуатації знаходяться малі ГЕС, вітроелектростанції, сонячні електричні станції і т. п. Проте у мережах, де активно встановлюються та експлуатуються РДЕ, а саме СЕС, має місце погіршення показників якості електричної енергії.

Представлені результати дослідження впливу активної потужності, яка виробляється СЕС на напругу на шинах 0,4 кВ споживачів. Доведено, що в локальних електричних системах: можливі режими, коли напруги на шинах 0,4 кВ споживачів можуть бути поза нормованими значеннями; майже не обмежуючі генерування активної потужності СЕС і регулюючі реактивну потужність СЕС є можливість регулювати напругу на шинах 0,4 кВ споживачів, запобігати понад нормованих відхилень напруги. Це зменшить використання РПН трансформаторів та перемикальних пристроїв батарей статичних конденсаторів.

Ключові слова: локальні електричні системи, розподілені джерела енергії, сонячні електричні станції, інвертори, районні електричні мережі, моделювання в PSCAD.

Вступ. Збільшення кількості розподілених джерел електричної енергії (РДЕ) викликає зростаючу зацікавленість в підвищенні рівня надійності локальних електричних систем (ЛЕС) в яких вони працюють. Також актуальними постають питання стійкості і оптимального розподілу струму в вітках таких ЛЕС.

РДЕ, які використовують відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) такі, як сонце, вітер і т. ін., все ширше використовуються не лише в найбільш розвинених країнах світу таких, як США, Німеччина, Данія, Нідерланди [2–5] та ін., а і в Україні. Станом на 1 січня 2015 року в Україні встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики, яким встановлено «зелений» тариф, становила 1462,2 МВт, з яких у 2014 році було введено 280,6 МВт. Різними розосередженими джерелами енергії у 2014 році вироблено 2,01 млрд. кВт·год. електроенергії, що на 32 % більше, ніж у 2013 році [1].

Так, наприклад, багато споживачів електричної енергії Ямпільського району Вінницької області вже почали відчувати високе проникнення розподіленої енергетики в ЛЕС на радіальних лініях електропередач (ЛЕП) розподільних електричних мереж (РЕМ).

Дослідженнями доведено, що між 11 та 14 годинами дня [6] генерування електричної енергії сонячним електричними станціями (СЕС) може перевищити максимальне навантаження фідера, до якого підключена СЕС, викликаючи зворотний потік потужності від СЕС до центру живлення (ЦЖ) ЛЕС, а не так, як це було раніше – від ЦЖ ЛЕС до споживачів РЕМ.

Інколи, це призводить до понаднормового зростання напруги в кінці фідера, через який здійснюється живлення споживачів. Двонаправлені потоки електричної потужності в радіальних ЛЕП, різкі зміни напруги на шинах електричних підстанцій (ПС), швидка зміна режимів ЛЕС стають все більш поширеними в сучасних ЛЕС. Це потребує внесення комплексних змін у систему планування режимів ЛЕС і оперативного впливу на них. Розуміння цих проблем вимагає подальших досліджень динаміки процесів в ЛЕС під час генерування електричної енергії РДЕ, транспортування та споживання. Для цього потрібні більш детальні інженерні дослідження і нові методи математичного та комп'ютерного моделювання.

Мета роботи: дослідження впливу сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ у локальних електричних системах.

Результати досліджень. Аналіз зростаючого впровадження СЕС свідчить про те, що в таких ЛЕС:

– потрібне впровадження додаткових засобів моніторингу режимів та стану обладнання фідерів ЛЕС з великою кількістю СЕС;

– потрібна «вахтова машина», наприклад, – синхронний генератор, який працює в якості резервного джерела електричної енергії ЛЕС у разі використання неавтономних інверторів СЕС (інверторів, робота яких неможлива за відсутності напруги на шинах з боку РЕМ);

– мають місце різкі зміни напруги на шинах ПС споживачів, напруга може перевищувати номінальну більше ніж на 10 % і як результат зростає інтенсивність роботи і зношуваність перемикаючих пристроїв регулювання напруги в ЛЕС;

– потрібно вживати додаткові заходи з захисту від комутаційних перенапруг, викликаних затяжними перехідними процесами під час частих увімкнень та вимкнень багатьох інверторів СЕС, коли проміжок часу між ними не перевищує однієї секунди;

– зростають струми замикань на фідерах з СЕС та струми гармонічних складових високої частоти в ізоляції кабельних ЛЕП [7], на які впливає змінна міжконтактна ємність комутаційного устаткування (вимикачів і реклоузерів), а це потребує додаткової координації заходів щодо узгодженої роботи комутаційного обладнання (автоматичних вимикачів, реклоузерів, запобіжників і т. п.);

– відключення великої кількості СЕС з причини замикань та інших пошкоджень в РЕМ, що призводять до відключення ЛЕП, які передають електричну енергію від СЕС;

– негативний вплив СЕС на ефективність засобів автоматизації (керування батареями статичних конденсаторів для регулювання реактивної потужності, автоматичне відключення навантаження і т. ін.) в РЕМ, за умови, що використання цих засобів автоматизації на проектній стадії не враховувало широкого впровадження СЕС;

– виникають технічні проблеми експлуатації обладнання РЕМ та споживачів, пов'язані з якістю електричної енергії СЕС, а саме – проблеми, викликані зростанням вмісту гармонік на шинах СЕС та виникненням високочастотних резонансів [6];

– має місце взаємовплив між високовольтним електронним устаткуванням, яке підключене до спільного фідера під час тимчасових змін напрямку потужності та при інших динамічних впливах;

– потрібне додаткове фінансування впровадження додаткових засобів дистанційного керування і автономного моніторингу у системних операторів з метою забезпечення керованості та спостережуваності режимів ЛЕС в яких працюють СЕС загальною встановленою потужністю понад 500 кВт.

Комп'ютерна модель ЛЕС. З метою дослідження вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ використовувалась комп'ютерна модель ЛЕС. Ця модель створена за допомогою програмного забезпечення PSCAD.

PSCAD (Power Systems computer-aided design/drafting) є потужним і гнучким графічним інтерфейсом користувача для моделювання процесів в електроенергетичних системах. PSCAD дозволяє користувачеві схематично будувати схеми, моделювати процеси в ЕЕС, аналізувати результати моделювання та керувати даними в повністю інтегрованому графічному середовищі. Моделі великої кількості електричного обладнання, електричних вимірювальних пристроїв, засобів ручного та автоматичного керування дозволяють користувачу контролювати та змінювати параметри системи під час моделювання, а також безпосередньо спостерігати за зміною параметрів досліджуваних процесів.

На рис. 1 показана схема ЛЕС, яка реалізована в комп'ютерній моделі.

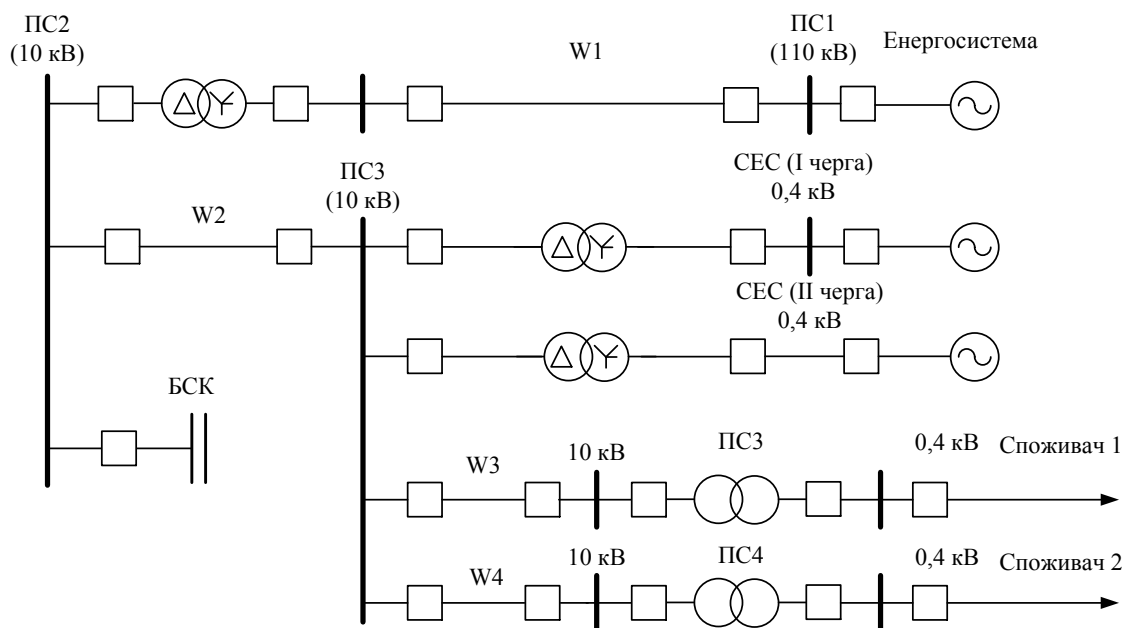


Рисунок 1– Схема ЛЕС

На схемі рис. 1 показані: електроенергетична система («Енергосистема»), яка має зв'язок з ЛЕС по ЛЕП 110 кВ: трансформаторна підстанція 110 кВ «ПС1». ПС1 має зв'язок з підстанцією «ПС2» по ЛЕП 110 кВ «W1». Шини та трансформатор ПС2 використовують напруги 110 кВ та 10 кВ. До шин 10 кВ ПС2 підключені ЛЕП 10 кВ «W2» та батарея статичних конденсаторів «БСК».

Підстанція «ПС3» розрахована на класи напруг 10 кВ. До шин ПС3 приєднані: трансформатор 10/0,4 кВ першої черги сонячної електричної станції (СЕС) та трансформатор 10/0,4 кВ другої черги СЕС, також ЛЕП 10 кВ (W3 та W4) 10 кВ. ЛЕП W3 та W4 приєднані до шин підстанцій ПС3 та ПС4 10/0,4 кВ споживачів («Споживач 1» та «Споживач 2»).

Сигналом, необхідним для введення СЕС (запропонованої моделі ЛЕС) в роботу, є напруга 0,4 кВ мережі ЛЕС. Тому «пуск» інверторів СЕС можливий лише за наявності напруги в 0,4 кВ мережі ЛЕС.

Результати моделювання. З метою дослідження впливу навантаження віддаленого від енергосистеми на напругу на шинах 0,4 кВ цього споживача змінювалась активна потужність першого споживача «Споживач 1», і контролювалась напруга на шинах 0,4 кВ підстанції «ПС3». Для споживачів 0,4 кВ дозволяється відхилення напруги $\pm 10\%$, тобто від 0,342 кВ до 0,418 кВ. Результати досліджень показані на рис. 2. Аналіз рис. 2 свідчить про те, що при включеній СЕС (СЕС генерує активну потужність $P_{СЕС}=1,83$ МВт) і навантаженні ($P_{НАВ}$) 0,435 МВт напруга на шинах 0,4 кВ першого споживача ($U_{СП}$) буде 0,418 кВ, що дорівнює верхньому граничному рівню напруги. Якщо потужність навантаження першого споживача буде меншою 0,435 МВт, то напруга $U_{СП}$ буде зростати (наприклад, при потужності $P_{СЕС}=1,95$ МВт та $P_{НАВ}=0,414$ МВт, напруга $U_{СП}$ буде 0,434 кВ, що перевищує допустиме значення. При потужності навантаження $P_{НАВ}=0,65$ МВт та $P_{СЕС}=1$ МВт напруга $U_{СП}$ буде 0,342 кВ, що дорівнює нижньому граничному значенню напруги. Якщо потужність навантаження першого споживача буде більшою 1,0 МВт, то напруга $U_{СП}$ буде зменшуватись (наприклад, при потужності $P_{СЕС}=0,7$ МВт та $P_{НАВ}=0,71$ МВт, напруга $U_{СП}$ буде 0,323 кВ, що менше допустимого значення).

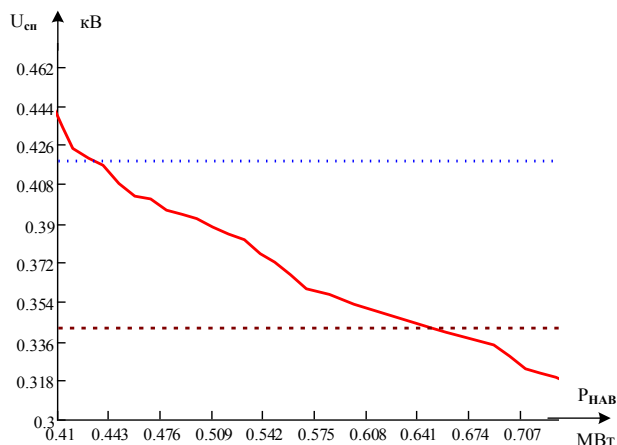


Рисунок 2 – Залежність $U_{СП}$ першого споживача від його навантаження $P_{НАВ}$

Дослідження залежності напруги на шинах 0,4 кВ першого споживача від активної потужності, яка виробляється СЕС (рис.3), свідчать про те, що зростання активної потужності СЕС призводить до зростання напруги на шинах споживача, а зменшення потужності СЕС призводить до зменшення напруги на шинах першого споживача.

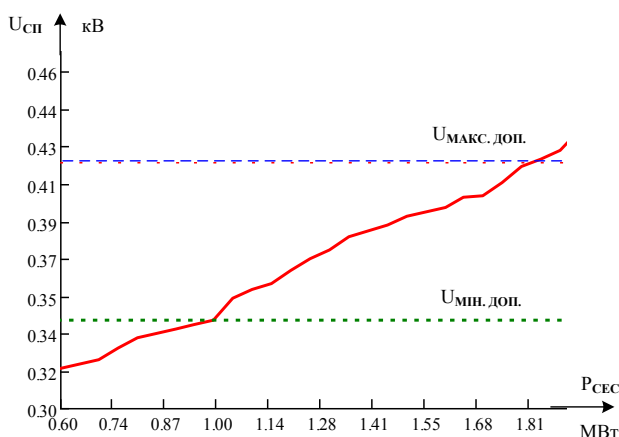


Рисунок 3 – Залежність напруги на шинах 0,4 кВ першого споживача від активної складової потужності СЕС

Отже, в ЛЕС можливі режими, коли напруги на шинах 0,4 кВ споживачів можуть перебувати поза нормованими значеннями. Регулювання напруг традиційно здійснюється шляхом використання РПН трансформаторів 110 кВ (35 кВ), перемикаючих пристроїв батарей статичних конденсаторів (БСК) і т. ін. Комутаційний ресурс таких перемикаючих пристроїв обмежений.

Тому, з метою дослідження можливості використання СЕС для усунення понад нормованих відхилень напруг на шинах споживачів, виконано моделювання процесів змін напруг на шинах підстанції ЛЕС. Результати моделювання показані на рис. 4.

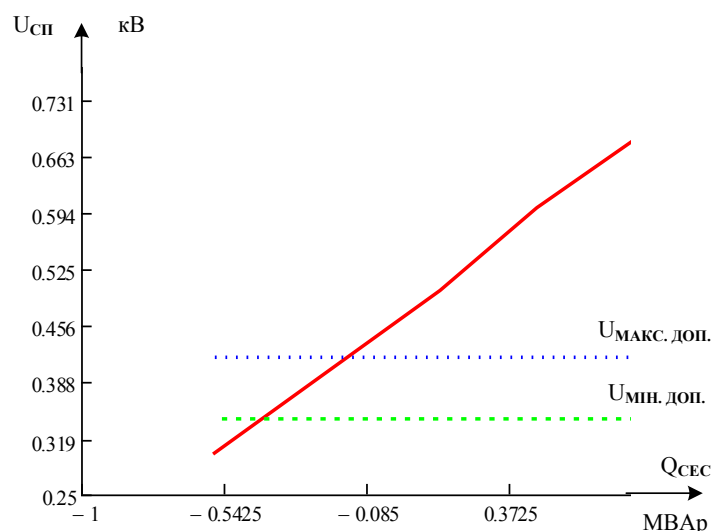


Рисунок 4 – Залежність напруги на шинах 0,4 кВ першого споживача від реактивної потужності СЕС

Аналіз залежності напруги на шинах 0,4 кВ першого споживача від реактивної потужності СЕС свідчить про те, що при активній потужності СЕС, яка змінювалась від 1,11 до 1,16 МВт, напруга на шинах споживача змінювалась від 0,3 кВ до 0,66 кВ при зміні реактивної потужності СЕС від $-0,54$ до $+0,62$ МВАр. Отже, майже не обмежуючі генерування активної потужності СЕС і регулюючі реактивну потужність СЕС є можливість регулювати напругу на шинах 0,4 кВ споживачів, запобігати понад нормованих відхилень напруги. Це зменшить використання РПН трансформаторів та перемикаючих пристроїв БСК.

Інформаційний обмін та керування СЕС в ЛЕС. Керування та інформаційний зв'язок в ЛЕС з великою кількістю інверторів СЕС потрібний для керування СЕС з метою запобігання або усунення понад нормованих відхилень напруги на шинах підстанцій, шляхом регулювання реактивної потужності СЕС. Завдання полягає в тому, щоб відмовитись від фіксованого коефіцієнта потужності та від постійної реактивної потужності СЕС, а мати можливість динамічно регулювати реактивну потужність СЕС у відповідності до змін потужності навантаження та потужності СЕС протягом доби.

Системи автоматичного керування СЕС можуть знаходитись на великій відстані від СЕС. Рекомендується використовувати відомі засоби автоматичного та автоматизованого керування СЕС та засоби диспетчерського контролю та керування ними.

Пристрої дистанційного керування забезпечують гнучкість і керованість, необхідну для оптимальної експлуатації обладнання ЛЕС і зменшення негативного впливу СЕС на параметри ЛЕС. Більшість відомих інверторів дозволяють регулювати реактивну потужність СЕС.

Хоча існуючі схеми і методи регулювання напруг на шинах ЛЕС, як і раніше потребують оптимізації керувальних впливів, оптимальних уставок пристроїв регулювання напруг та коефіцієнтів потужності, потребують оптимального регулювання реактивної потужності і т. п., керуючі впливи від блоку керування, розташованого, наприклад, в центрі інформаційного обміну та керування (ЦЮК) СЕС району електричних мереж (ЛЕС). ЦЮК здійснює збирання, збирання та обробку інформації про параметри роботи СЕС в ЛЕС і передає сигнали керування на СЕС для забезпечення оптимальних режимів їх експлуатації в ЛЕС.

Пристроями централізованого керування (ПК) СЕС повинні бути розраховані на те, що в ЛЕС можуть використовуватись потужні інвертори різних виробників. Якщо є багато інверторів, то для обміну інформацією між ПК і СЕС можуть використовуватись різні блоки керування інверторами та різні протоколи обміну інформацією. Також використовуються комунікаційні команди, які можуть надходити через групи комунікаційних контролерів, які умовно об'єднані в кластери, як показано на рис. 5.

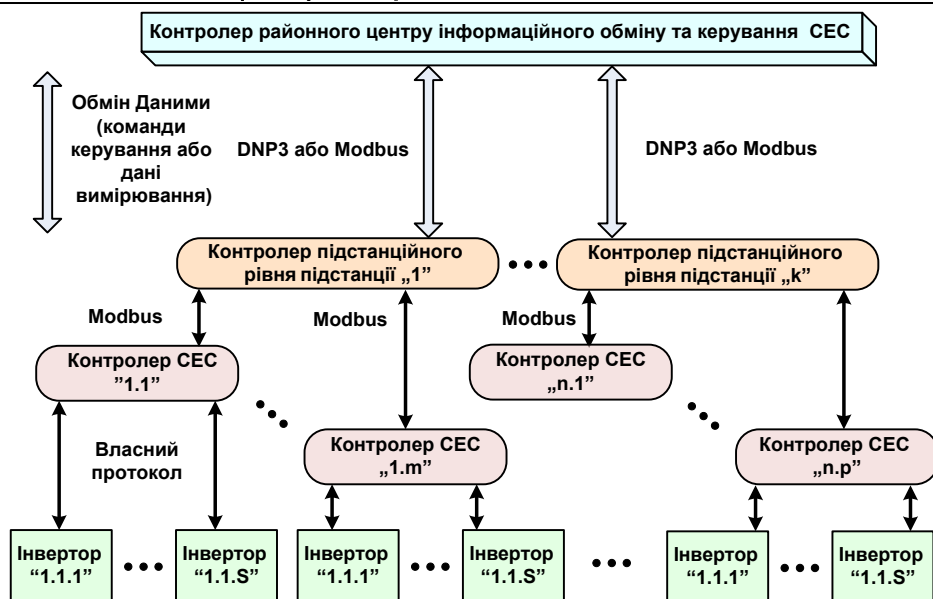


Рисунок 5 – Схема обміну даними між СЕС та центром інформаційного обміну та керування СЕС в ЛЕС

На рис.5 показано, що контролери нижнього рівня, які вбудовані в інвертори СЕС, обмінюються даними з контролерами СЕС. Наприклад, контролери у першій СЕС «1.1», використовується S контролерів, які передають дані на контролер СЕС «1.1» за власним протоколом обміну даними. Контролер СЕС «1.1» обмінюється інформацією з контролером підстанційного рівня підстанції «1». Для інформаційного зв'язку підстанції «1» з СЕС (m – кількість СЕС, які мають інформаційний зв'язок з підстанцією «1») використовується протокол Modbus. Modbus – відкритий комунікаційний протокол, заснований на архітектурі «ведучий-ведений» (master-slave). Широко застосовується для організації зв'язку між електронними пристроями. Може використовуватися для передачі даних через послідовні лінії зв'язку RS-485, RS-422, RS-232, а також мережі TCP/IP. Для інформаційного зв'язку з контролером районного центру інформаційного обміну та керування використовуються протоколи DNP3 або Modbus. DNP3 (Distributed Network Protocol) — це протокол передачі даних, що використовується для зв'язку між компонентами АСУ ТП. Він був розроблений для зручної взаємодії між різними типами пристроїв і систем керування і може застосовуватися на різних рівнях АСУ ТП. Існує розширення Secure Authentication для DNP3 для безпечної аутентифікації.

Висновки

Оптимальне керування та диспетчеризація режимів локальних електроенергетичних систем є невід'ємними частинами, які сприяють їх широкому впровадженню РДЕ.

On-line моніторинг інверторів СЕС і ефективне використання Smart технологій в ЛЕС:

- додає більшої гнучкості електричним постачальним підприємствам в питаннях надійного та якісного забезпечення споживачів електричною енергією;

- дозволяє зменшити негативний вплив СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС,

- забезпечує оптимальний розподіл генерованої РДЕ активної та реактивної потужностей.

Розробка та впровадження SMART інверторів потребують подальших досліджень, оцінювання, тестування та порівняльного аналізу. Це дасть можливість визначити характерні риси різних інверторів СЕС та їх вплив на показники якості електричної енергії в різних режимах ЛЕС і точно визначити, як вони реагують на різні системні події такі, наприклад, як зміни напруги, пошкодження обладнання ЛЕС тощо.

Під час планування та аналізу режимів ЛЕС потрібно враховувати особливості інверторів СЕС і вимоги, щодо їх налаштування та експлуатації. Це сприятиме виконанню вимог угод між енергопостачальними підприємствами і споживачами, а також дасть можливість враховувати наявні в ЛЕС пристрої автоматизації та оперативного керування.

Хоча багато уваги приділяється вдосконаленню керування РДЕ в ЛЕС, однак ще багато аспектів впровадження елементів керування, оптимізації схем і параметрів ЛЕС, інтеграції інверторів СЕС в ЛЕС залишаються актуальними в наш час. Процеси впровадження засобів централізованого керування СЕС в ЛЕС вимагають узгодження з існуючою інфраструктурою ЛЕС.

Передові методи моделювання з використанням програмних засобів PSCAD дозволяють здійснювати моделювання режимів ЛЕС у реальному часі та дослідити поведінку інверторів СЕС при їх взаємодії в ЛЕС.

Список літератури

1. Дьяконов В. Зеленая энергетика поможет соскочить с российской газовой иглы [Электронный ресурс] / Валерий Дьяконов // Экономические известия. – 27.03.2015. – С 1. – Режим доступа: <http://ekonomika.eizvestia.com/full/213-zelenaya-energetika-po-mozhet-soskochit-s-rossijskoj-gazovoj-igly>.
2. Timbus, A. Evaluation of current controllers for distributed power generation system/ A. Timbus, M. Lisser, R. Teodorescu, P. Rodriguez, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on power electronics. – 2009. – V.24, № 3. – P. 654-664.
3. Enslin, J. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network / J. Enslin, P. Heskes // IEEE Transactions on power electronics. – 2004. – V.19, № 6. – P. 1586-1593.
4. Pepermans, G Distributed generation: definition, benefits and issues / G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D'haeseleer // Energy Policy. 2005. – №33.-P. 787-798.
5. Degeroote, L. Fast harmonic simulation method for the analysis of network losses with converter-connected distributed generation / L. Degeroote, L. Vandeveld, B. Renders // Electric Power Systems Research. – 2010. №80. – P. 1332-1340.
6. Katiraei, F. Accidental islanding of distribution systems with multiple distributed generation units of various technologies [Text] / Farid Katiraei, Tim Chang, Chase Sun. // Symposium "Grid of the Future 2013". – 2013. Boston, MA. Oct. 22. – P. 1-20
7. Лежнюк, П. Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС / П. Д. Лежнюк, Рубаненко О. Є., І. О. Гунько // Вісник Хмельницького національного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – №2. – С. 134-139.

P. D. Lezhnyuk, A. E. Rubanenko, I. A. Gunko
Vinnitsa National Technical University

THE INFLUENCE OF SOLAR POWER PLANTS ON VOLTAGE OF 0.4 KV CONSUMERS

Nowadays many countries use alternative forms of energy. In operation are small hydropower plants, wind farms, solar power plants and so on. However, in networks where established and actively operated IDR such as SES, there is a deterioration in the quality of electricity.

The results of the study of the effect of active power produced SES on pressure in tires 0.4 kV consumers. It is proved that a local electric systems, possible modes when the voltage on tires 0.4 kV consumers may be out of normalized values; hardly limiting active power generation SES and control reactive power is possible to adjust the tension on tires 0.4 kV consumers normalized deviations prevent over voltage. This will reduce the use of RPN transformers and switching devices battery of static capacitors.

Keywords: local electrical systems, distributed energy sources, solar power plants, inverters, regional electric network modeling in PSCAD.

References

1. Dyakonov V. Green Energy will jump off of Russian gas needle [Electron resource] / Valery Dyakonov // Economic News. – 27.03.2015. – P. 1. – Access mode: <http://ekonomika.eizvestia.com/full/213-zelenaya-energetika-po-mozhet-soskochit-s-rossijskoj-gazovoj-igly>.
2. Timbus, A. Evaluation of current controllers for distributed power generation system/ A. Timbus, M. Lisser, R. Teodorescu, P. Rodriguez, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on power electronics. – 2009. – V.24, № 3. – P. 654-664.
3. Enslin, J. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network / J. Enslin, P. Heskes // IEEE Transactions on power electronics. – 2004. – V.19, № 6. – P. 1586-1593.
4. Pepermans, G Distributed generation: definition, benefits and issues / G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D'haeseleer // Energy Policy. 2005. – №33.-P. 787-798.
5. Degeroote, L. Fast harmonic simulation method for the analysis of network losses with converter-connected distributed generation / L. Degeroote, L. Vandeveld, B. Renders // Electric Power Systems Research. – 2010. №80. – P. 1332-1340.
6. Katiraei, F. Accidental islanding of distribution systems with multiple distributed generation units of various technologies [Text] / Farid Katiraei, Tim Chang, Chase Sun. // Symposium "Grid of the Future 2013". – 2013. Boston, MA. Oct. 22. – P. 1-20
7. Lezhniuk, P. D. Effect inverters SES indicators of quality of electric energy in LES / P. D. Lezhniuk, A. E. Rubanenko, I. A. Gunko // Bulletin Khmelnytsky National Technical University. Series: Technical sciences. - 2015. - №2. - P. 134-139.

УДК621.316.1: 313.322

П. Д. Лежнюк, докт. техн. наук, професор, **О. Є. Рубаненко**, канд. техн. наук, доцент, **І.О. Гунько**

Винницький національний технічний університет

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ 0,4 КВ

В наше время во многих странах мира используют альтернативные виды энергии. В эксплуатации находятся малые ГЭС, ветроэлектростанции, солнечные электрические станции и т. п. Однако в сетях, где активно устанавливаются и эксплуатируются РДЭ, а именно СЭС, имеет место ухудшение показателей качества электрической энергии.

Представлены результаты исследования влияния активной мощности, производимой СЭС, на напряжения на шинах 0,4 кВ потребителей. Доказано, что в локальных электрических системах: возможны режимы, когда напряжения на шинах 0,4 кВ потребителей могут иметь ненормированные значения, почти не ограничивающие генерирования активной мощности СЭС и регулирующие реактивную мощность СЭС; есть возможность регулировать напряжение на шинах 0,4 кВ потребителей, предотвращая превышение нормированных отклонений напряжения. Это уменьшит использование РПН трансформаторов и переключающих устройств батарей статических конденсаторов.

Ключевые слова: локальные электрические системы, распределенные источники энергии, солнечные электрические станции, инверторы, районные электрические сети, моделирование в PSCAD.

Надійшла 30.06.2015

Received 30.06.2015

УДК 681.523

Г.И. Канюк¹, д-р техн. наук, проф., декан энергетического факультета,

И.А. Бабенко², директор

А.Ю. Мезеря¹, канд. техн. наук, доцент, И.П. Лаптинов¹, ассистент, В.Н. Князева¹, инженер

¹ - Украинская инженерно-педагогическая академия

² - Змиевская тепловая электрическая станция публичного акционерного общества «Центрэнерго»

РЕЗЕРВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УПРАВЛЕНИИ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСАМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В статье проведен анализ и обработка данных экспериментального исследования центробежного насоса тепловых электростанций. Показан возможный экономический эффект при использовании алгоритмов энергосберегающего управления центробежным насосом и определен закон такого управления.

Ключевые слова: центробежный насос, энергосбережение, автоматизированная система управления.

Введение

Основными потребителями собственных нужд тепловых и атомных электростанций являются центробежные насосы. Главная научная проблема создания энергосберегающих систем управления насосными установками состоит в построении точных математических моделей энергетических процессов и объектов, в определении и минимизации функций энергетических потерь, в синтезе алгоритмов управления, которые реализуют в реальном времени режимы работы насосов с минимальными потерями энергии.

Уменьшение внепроектных затрат энергии на собственные нужды на 5% эквивалентно экономии 40 млн. гривен в год с каждой 1000 МВт. В масштабах Украины (при установленной мощности ТЭС и ТЭЦ порядка 10000 МВт) это составляет порядка 400 млн. гривен в год.

В работах [1-4] изложены основные теоретические принципы автоматизированного энергосберегающего управления нагнетательными установками электростанций, показаны алгоритмы, функциональные и структурные схемы такого управления. Целью настоящей статьи является анализ экспериментальных исследований и определение резервов энергосбережения при управлении центробежными насосами собственных нужд энергоблоков. Экспериментальные исследования проводились на базе Змиевской ТЭС.

Результаты исследования

Для исследования возможного энергосбережения проведем анализ работы насоса распространенного типа, мощностью 250 кВт. Таковым является центробежный насос двухстороннего входа типа Д630-90 для перекачивания воды.

Основные паспортные данные насоса приведены в таблице 1.

В результате эксперимента получены характеристики насоса Д630-90, приведенные на рис. 1.

Температура $T=22^{\circ}\text{C}$, давление $P=755$ мм.рт.ст. Снятие характеристик проводились для трёх частот: 980 об/мин (рис. 1 а), 1200 об/мин (рис. 1 б) и 1475 об/мин (рис. 1 в).

Таблица 1 – Паспортные данные насоса Д630-90

Тип	Номинальная мощность двигателя $N_{дв}$, кВт	Расход Q , м ³ /ч	Напор H , м	Частота вращения n , об/мин
Д630-90	250	0,175	90	980/1450

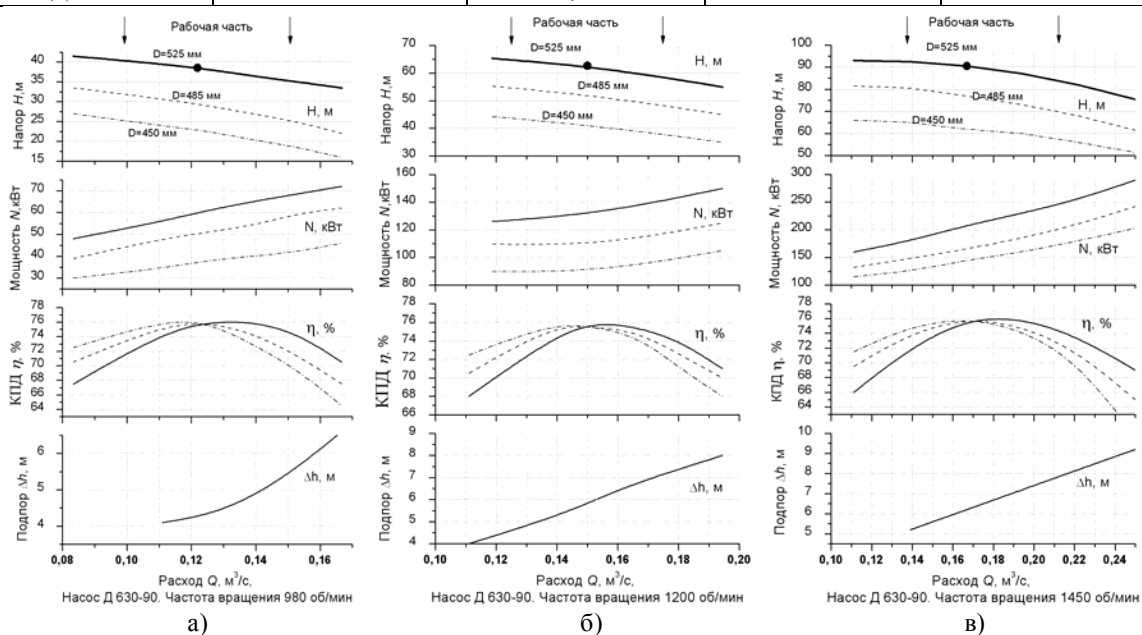


Рисунок 1 – Характеристика насоса Д630-90

Проведем анализ работы насоса. Возьмем три значения расхода, соответствующих максимальному, минимальному и среднему режиму работы насоса. Таковыми расходами являются $Q_1=0,111$ м³/с, $Q_2=0,153$ м³/с и $Q_3=0,194$ м³/с. Численные значения параметров насоса при этих значениях расходов и различных частотах вращения приведены в таблицах 2-4:

Таблица 2 – Характеристики насоса Д630-90 при $Q_1=0,111$ м³/с

Параметр	Расход $Q_1=0,111$ м ³ /с или 400 м ³ /ч								
	Частота вращения $n_1=980$ об/мин			Частота вращения $n_2=1200$ об/мин			Частота вращения $n_3=1450$ об/мин		
	450	485	525	450	485	525	450	485	525
Диаметр колеса D , мм	450	485	525	450	485	525	450	485	525
Напор H , м	24,3	30,7	39,5	45	56	66	66	81,5	93
Потребляемая мощность $N_э$, кВт	34,5	48	56	90	110	125	115	132	160
КПД η , %	<u>76,2</u>	75,5	<u>74,5</u>	71	70	68	71,5	69,5	66
Дополнительный напор $h_{доп}$, м	4,15	4,15	4,15	4	4	4	4,2	4,2	4,2
Гидравлическая мощность $N_Г=(N_э \eta/100)$, кВт	26,4	33,4	42,97	48,95	60,9	71,8	71,79	88,65	101,16
Потери мощности $\Delta N=N_э(1-\eta)$, кВт	26,3	36,24	41,72	63,9	77	85	82,2	91,74	105,6

Таблица 3 - Характеристики насоса Д630-90 при $Q_2=0,153 \text{ м}^3/\text{с}$

Параметр	Расход $Q_2=0,153 \text{ м}^3/\text{с}$ или $550 \text{ м}^3/\text{ч}$								
	Частота вращения			Частота вращения			Частота вращения		
	$n_1=980 \text{ об/мин}$			$n_2=1200 \text{ об/мин}$			$n_3=1450 \text{ об/мин}$		
Диаметр колеса D , мм	450	485	525	450	485	525	450	485	525
Напор H , м	18,5	25	35	41	52	62,5	64	79	91
Потребляемая мощность $N_э$, кВт	42	59,5	68,5	89	108	131	135	159	195
КПД η , %	69,5	71,5	74,5	74	75	76	75,7	75,3	74,2
Дополнительный напор $h_{\text{доп}}$, м	5,65	5,65	5,65	5,7	5,7	5,7	5,9	5,9	5,9
Гидравлическая мощность $N_{\Gamma}=(N_э \eta/100)$, кВт	27,7	37,49	52,479	61,48	77,97	93,71	95,96	118,45	136,4
Потери мощности $\Delta N=N_э(1-\eta)$, кВт	29,2	42,54	51,03	66,31	81	98,9	102,2	119,7	144,7

Таблица 4 – Характеристики насоса Д630-90 при $Q_3=0,194 \text{ м}^3/\text{с}$

Параметр	Расход $Q_3=0,194 \text{ м}^3/\text{с}$ или $700 \text{ м}^3/\text{ч}$								
	Частота вращения			Частота вращения			Частота вращения		
	$n_1=980 \text{ об/мин}$			$n_2=1200 \text{ об/мин}$			$n_3=1450 \text{ об/мин}$		
Диаметр колеса D , мм	450	485	525	450	485	525	450	485	525
Напор H , м	10	19	28	35	45	55	60	73	87
Потребляемая мощность $N_э$, кВт	51	64,5	70	105	125	150	160	185	230
КПД η , %	46	55	60	68	70	71	74,5	75	76,1
Дополнительный напор $h_{\text{доп}}$, м	5,65	5,65	5,65	5,7	5,7	5,7	7,2	7,2	7,2
Гидравлическая мощность $N_{\Gamma}=(N_э \eta/100)$, кВт	19	36,12	53,23	66,54	85,5	104,57	114,07	138,79	165,4
Потери мощности $\Delta N=N_э(1-\eta)$, кВт	23,5	35,48	42	71,4	87,5	106,5	119,2	138,75	175,03

Точность определения аппроксимированных значений параметров насоса, а значит и модели управления, зависит в большой степени от точности измерения параметров энергетических характеристик (расход, давление и др.). На этом вопросе мы останавливаться не будем, т.к. он требует отдельного решения. Будем считать, что точность измерения энергетических характеристик насоса нас устраивает.

Возможные резервы повышения КПД при плавном частотном регулировании в окрестностях трех рабочих точек:

$$\Delta\eta=\eta_{\text{max}}-\eta_{\text{min}} \quad (1)$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 5. Значения η_{max} , η_{min} в (1) взяты из таблиц 2–4, где они, для наглядности, выделены подчеркиванием.

Таблица 5

	$n_1=980 \text{ об/мин}$	$n_2=1200 \text{ об/мин}$	$n_3=1450 \text{ об/мин}$
$\Delta\eta$, %	76,2-74,5=1,7	76-74=2	76,1-74,5=1,6

Возможные резервы снижения затрат мощности на привод насоса, определяются по выражению:

$$\Delta N=N_{\text{cp}}\Delta\eta, \quad (2)$$

где N_{cp} – среднее значение потребляемой мощности для данной частоты вращения в рабочем диапазоне (в диапазоне максимальных КПД)

Значения ΔN занесем в таблицу 6.

Таблица 6

	$n_1=980$ об/мин	$n_2=1200$ об/мин	$n_3=1450$ об/мин
ΔN , кВт	0,017 60=1,02	0,02 140=2,8	0,016 230=3,7

Потенциальная годовая экономия в денежном эквиваленте:

$$\mathcal{E} = \Delta N \cdot T_{\text{уст}} \cdot C \quad (3)$$

где: $T_{\text{уст}} = 4500$ ч – число часов использования установленной мощности;

C – себестоимость выработки 1 кВтч электроэнергии. Согласно [5], удельный расход топлива (уголь) на Змиевской ТЭС в 2012 г. составлял 320-380 г/кВтч в зависимости от загрузки блока и сорта угля. Стоимость угля колеблется от 2000 до 3000 грн. Тогда можно принять $C = 0,9$ грн/кВтч.

Таблица 7 – Потенциальная годовая экономия

	$n_1=980$ об/мин	$n_2=1200$ об/мин	$n_3=1450$ об/мин
\mathcal{E} , грн/год	4131	11340	15000

Годовой экономический эффект, показанный в табл. 7, определяет денежный эквивалент разницы в потерях энергии при 3-х частотном и плавном способе регулирования насоса.

Из экспериментальных характеристик (значения в табл. 2-4) можно также получить ряд зависимостей, которые в дальнейшем будут использованы для определения потерь энергии и создания модели управления:

1. Зависимость напора H от частоты вращения n и расхода Q при $D=525$ мм (таб.8):

Таблица 8

	$D=525$ мм			Q , м ³ /с
	n , об/мин			
	980	1200	1450	
H , м	39,5	66	93	0,111
	35	62,5	91	0,153
	28	55	87	0,194

Аппроксимируя табличные данные, получим:

$$H(Q,n) = 22,21 \cdot Q^2 \cdot n - 0,009 \cdot Q^2 \cdot n^2 - 12087 \cdot Q^2 + 0,0024 \cdot Q \cdot n^2 - 5,81 \cdot Q \cdot n + 3317,5 \cdot Q - 0,0001 \cdot n^2 + 0,193 \cdot n - 109,6 \text{ м} \quad (4)$$

2. Зависимость потребляемой мощности $N_{\mathcal{E}}$ от частоты вращения n и расхода Q при $D=525$ мм (таб.9):

Таблица 9

	$D=525$ мм			Q , м ³ /с
	n , об/мин			
	980	1200	1450	
$N_{\mathcal{E}}$, кВт	56	125	160	0,111
	68,5	131	195	0,153
	70	150	230	0,194

Аппроксимируя табличные данные, получим:

$$N_{\mathcal{E}}(Q,n) = 186,7 \cdot Q^2 \cdot n - 0,074 \cdot Q^2 \cdot n^2 - 114001,44 \cdot Q^2 + 0,025 \cdot Q \cdot n^2 - 62,03 \cdot Q \cdot n + 37360,7 \cdot Q - 0,0022 \cdot n^2 + 5,57 \cdot n - 3352,97 \text{ кВт} \quad (5)$$

3. Зависимость КПД η от частоты вращения n и расхода при $D=525$ мм (таб.10):

Таблица 10

	D=525 мм			Q, м ³ /с
	n, об/мин			
	980	1200	1450	
η, %	74,5	68	66	0,111
	74,5	76	74,2	0,153
	60	71	76,1	0,194

Аппроксимируя табличные данные, получим:

$$\eta(Q,n) = 47,6 \cdot Q^2 n - 0,019 \cdot Q^2 n^2 - 25666 \cdot Q^2 + 0,007 \cdot Q \cdot n^2 - 17,83 \cdot Q \cdot n + 10184,6 \cdot Q - 0,00058 n^2 + 1,52 n - 971,6 \% \quad (6)$$

4. Зависимость потерь мощности ΔN от частоты вращения n и расхода Q при D=525 мм (таб.11):

Таблица 11

	D=525 мм			Q, м ³ /с
	n, об/мин			
	980	1200	1450	
ΔN, кВт	14,28	40	54,4	0,111
	17,46	32,1	46,6	0,153
	28	43,5	54,97	0,194

Аппроксимируя табличные данные, получим:

$$\Delta N(Q,n) = 0,052 \cdot Q^2 n^2 - 135,7 \cdot Q^2 n + 81281 \cdot Q^2 - 0,016 \cdot Q n^2 + 42,64 \cdot Q n - 25830 \cdot Q + 0,00128 n^2 - 3,41 n + 2091 \text{ кВт} \quad (7)$$

Для определения закона управления насосом, аппроксимируем зависимость КПД η от расхода для различных частот вращения (табл.12):

Таблица 12

n=980 об/мин		n=1200 об/мин		n=1450 об/мин	
Q, м ³ /с	η, %	Q, м ³ /с	η, %	Q, м ³ /с	η, %
0,0833	67,5	0,111	68	0,111	66
0,111	74,5	0,1389	74,5	0,1389	72
0,125	76	0,1528	76,1	0,1667	76
0,1389	76,1	0,1667	75,5	0,1944	76,1
0,1528	74,5	0,1806	74	0,222	73,5
0,1667	70,5	0,1944	71	0,25	69

Для частоты n=980 об/мин получаем: $\eta = 7,643 + 1055 \cdot Q - 4057 \cdot Q^2$.

Приравняв первую производную $\eta' = 1055 - 8114 \cdot Q$ к нулю, получим значение расхода $Q = 0,1297 \text{ м}^3/\text{с}$, при котором КПД будет максимальным.

Для частоты n=1200 об/мин получаем: $\eta = -14,946 + 1153 \cdot Q - 3658 \cdot Q^2$.

Приравняв первую производную $\eta' = 1153 - 7346 \cdot Q$ к нулю, получим значение расхода $Q = 0,1576 \text{ м}^3/\text{с}$, при котором КПД будет максимальным.

Для частоты n=1450 об/мин получаем: $\eta = 13,232 + 677,54 \cdot Q - 1821 \cdot Q^2$.

Приравняв первую производную $\eta' = 677,54 - 3642 \cdot Q$ к нулю, получим значение расхода $Q = 0,186 \text{ м}^3/\text{с}$, при котором КПД будет максимальным.

Графически эти зависимости показаны на рис. 2.

Пересчитав число оборотов на расход, при котором будет максимальный КПД, получим зависимость экономической эффективности от расхода (рис. 3) и зависимость частоты вращения n от расхода Q, при которой будет обеспечен максимальный КПД насосной установки (рис. 4).

Закон управления:

- при аппроксимации полиномом второго порядка:

$$n(Q) = A Q^2 + B Q + C$$

$$n(Q) = 15244,4 \cdot Q^2 - 3535,47 \cdot Q + 265 \text{ об/мин} \quad (8)$$

- при линейной аппроксимации:

$$n(Q) = 8350 \cdot Q - 107,06 \text{ об/мин} \quad (9)$$

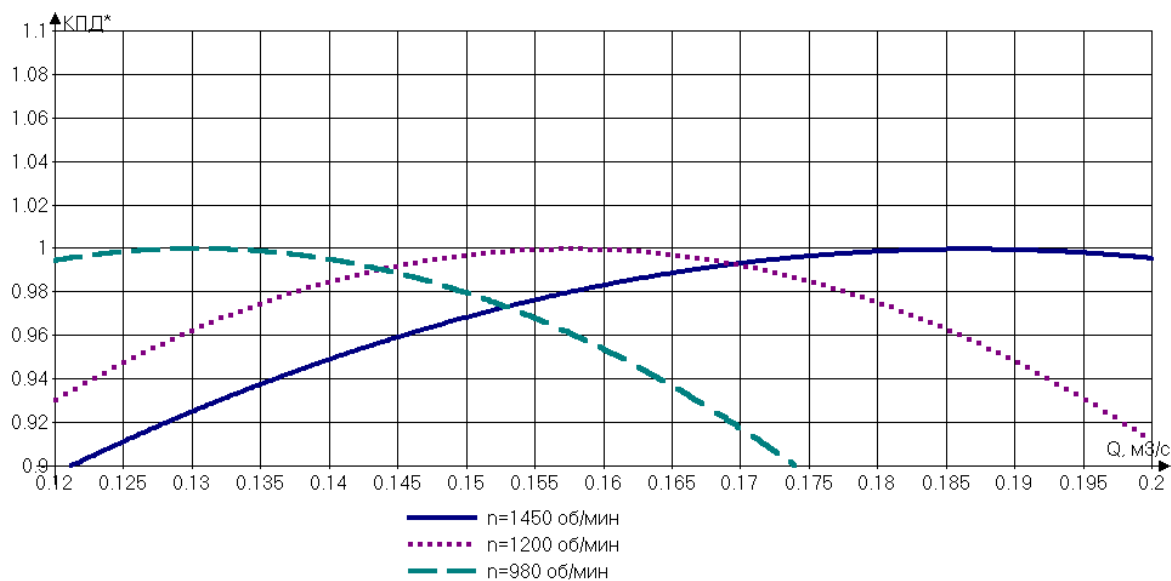


Рисунок 2 – Зависимость относительного КПД*= η/η_{\max} от расхода Q для различных частот вращения

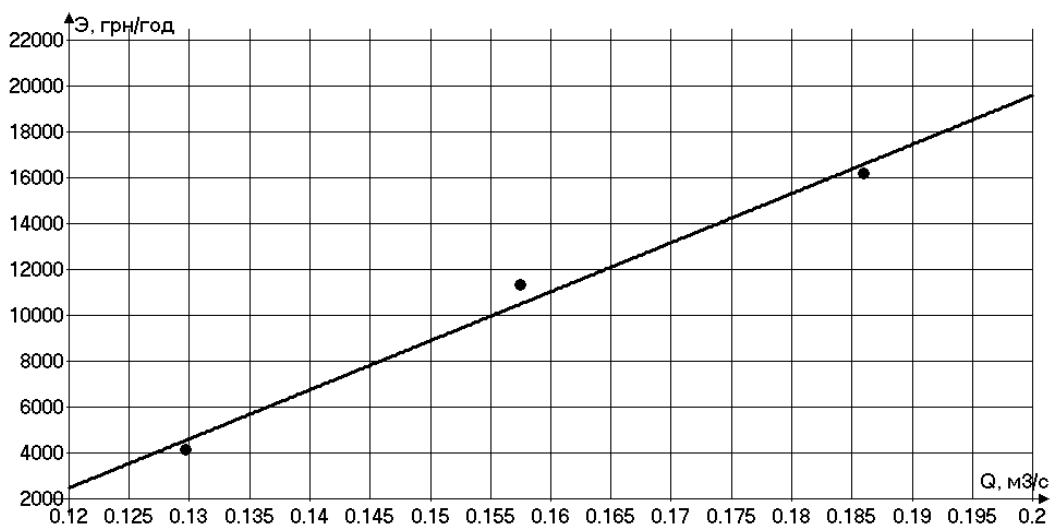


Рисунок 3 – Ожидаемая экономическая эффективность. Насос Д630-90.



Рисунок 4 - Зависимость частоты вращения n от расхода Q , при которой будет обеспечен максимальный КПД насосной установки. Насос Д630-90.

Сравним потери при дросселировании и 3-х ступенчатом частотном управлении (табл. 13). Значения потерь мощности взяты из таблиц 2-4 (экспериментальные характеристики) или получены при помощи экстраполяции для промежуточных значений расходов:

Таблица 13 – Сравнение эффективности способов управления

	Расход Q , м ³ /с				
	0,111	0,139	0,153	0,167	0,181
Потери при дросселировании, кВт	28,6	31,25	36,42	39,4	47,4
Потери при 3-х ступенчатом частотном управлении, кВт	14,28	17,5	26,8	-	-
Разница потерь, кВт	14,32	13,75	9,62	-	-
Годовой экономический эффект, грн	58 000	55 687	38 961	-	-

Как видно из табл. 13, при 3-х ступенчатом частотном управлении на малых расходах эффективность увеличивается, в то время как при плавном регулировании в окрестностях одной частоты (табл. 7) эффективность снижается по мере снижения подачи. Общий экономический эффект от применения плавного регулирования (в сравнении с дросселированием) будет равен сумме значений, взятых из таблиц 7 и 13.

Выводы

1. Экспериментальные исследования показали работоспособность алгоритмов автоматизированного энергосберегающего управления центробежными насосами, изложенных в [1-4] и экономическую целесообразность их использования.

2. Автоматизированная система управления, работающая по такому принципу, может обеспечить годовой экономический эффект при управлении, который для небольшого насоса 250 кВт составляет 50 тыс.грн./год.

Список литературы

1. Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Фокина А.Р., Лаптинова Е.В., Лаптинов И.П. Энергосберегающее управление и повышение технико-экономической эффективности насосных установок тепловых и атомных электростанций/ Східно-Європейський журнал передових технологій. –Харків: –2012. –№. 3/8 (57). –С.58-62.

2. Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Михайский Д.В., Лаптинов И.П., Фокина А.Р. Резервы энергосберегающего управления технологическими процессами на действующих ТЭС и АЭС. –Харьков: Изд-во «Точка», 2012. –184с. Русс. яз.

3. Канюк Г.И., Артюх С.Ф., Мезеря А.Ю., Лаптинова Е.В., Мельников В.Е. Научные принципы энергосбережения в тепловой и атомной энергетике. –Харьков: Изд-во «Точка», 2013. –140 с. Русс. яз.

4. Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Лаптинов И.П. Модель энергосберегающего управления нагнетательными установками тепловых электростанций. Вісник НТУ «ХПІ»: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. №12(1055), 2014. – С.90-97.

1. Змиевская ТЭС. Графики исходно-нормативных удельных расходов топлива энергоблока ст. № 8. Отчет НАК «Энергетическая компания Украины», 2012.

G. Kaniuk¹, I. Babenko², A. Mezerya¹, I. Laptinov¹, V. Knyazeva¹

¹ - Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy

² -Zmiyiv thermal power stations of JSC "Centrenergo"

ENERGY SAVE FROM AUTOMATIC REGULATION CENTRIFUGAL PUMP IN POWER PLANT STATION

In article is organized analysis and data processing the experimental study of the centrifugal pump heat power station. Possible economic effect is shown when use algorithm energy saving centrifugal pump management and is determined law of such management.

The Keywords: centrifugal pump, energysave, automated managerial system

References

1. Kanyuk G.I., Mezerya A.Y., Fokina A.R., Laptinova E.V., Laptinov I.P. Energysave management and increasing to technical-economic efficiency of the pumping installation heat and atomic power station/ East-European journal leading technology. -Harkov: -2012. - . 3/8 (57) -p.58-62.

2. Kanyuk G.I., Mezerya A.Y., Mihayskiy D.V., Laptinov I.P., Fokina A.R. The Reserves energysave management technological process on acting TES and AES. -Harkov: Izd-in "Point", 2012. -184с. Russ.

3. Kanyuk G.I., Artyuh S.F., Mezerya A.Y., Laptinova E.V., Miller V.E. The Scientific principles energysave in heat and atomic energetike. -Harkov: Izd-in "Point", 2013. -140 p. Russ. .

4. Kanyuk G.I., Mezerya A.Y., Laptinov I.P. The Model of energysave management pump installation heat power station. Vesnik NTU "HPI": Energetic that teplotechnich process and management. 12(1055), 2014. - p.90-97.

5. Zmievska TES. The graphs is come-normative specific expenses fuel energyblock № 8. The report NAK "Energy company of the Ukraine", 2012.

УДК 681.523

Г. І. КАНЮК¹, д-р техн. наук, проф., декан енергетичного факультету

І. А. БАБЕНКО², директор

А. Ю. Мезеря¹, кан. техн. наук, доцент, **І. П. Лаптінов¹**, асистент, **В. М. Князєва¹**, інженер

¹ – Українська інженерно-педагогічна академія

² – Зміївська тепла електрична станція Публічного акціонерного товариства «Центрэнерго»

РЕЗЕРВИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ АВТОМАТИЗОВАНОМУ УПРАВЛІННІ ВІДЦЕНТРОВИМИ НАСОСАМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У статті проведено аналіз і обробку даних експериментального дослідження відцентрового насоса теплових електростанцій. Показано можливий економічний ефект від використання алгоритмів енергозберігаючого керування відцентровим насосом і визначено закон такого керування.

Ключові слова: відцентровий насос, енергозбереження, автоматизована система керування.

Надійшла 15.09.2015

Received 15.09.2015

УДК 621.317

А.В. Волошко, д-р. техн. наук., доцент кафедри електропостачання
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ»

КЛАСИФІКАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ЗА ВІДНОСНОЮ ЕНТРОПІЄЮ ПО РІВНЯХ ВЕЙВЛЕТ- ДЕКОМПОЗИЦІЇ

Актуальність роботи обумовлена тим, що оскільки графік електричного навантаження являє собою реалізацію випадкового процесу, то його ідентифікація повинна представляти розклад на детерміновану та випадкову складові. При цьому найбільш прийнятним математичним апаратом на даний час є ортогональні перетворення, серед яких найбільш вживаним є вейвлет-аналіз. У даній роботі представлено метод ідентифікації та класифікації інформаційних сигналів (на прикладі графіка електричних навантажень) за відотною ентропією по рівнях вейвлет-декомпозиції.

Ключові слова: графік електричного навантаження, ідентифікація, класифікація, ентропія, вейвлет-аналіз.

Вступ. Як відомо, платформою для виконання класифікації інформаційних сигналів є дискримінація, кластеризація та групування. При дискримінаційному аналізі класи задаються площинами ймовірностей або навчальними вибірками. Поняття дискримінації має декілька синонімів: розпізнавання образів, діагностика, автоматична класифікація із вчителем, статистична класифікація і т. ін. [1].

Найбільш широке поширення отримало розпізнавання образів. Під ним розуміється: побудова кластерів на основі великої кількості навчальних даних, надання кожному із кластерів відповідної мітки, асоціювання кожного об'єкту, який отриманий на вході алгоритму розпізнавання, із міткою відповідного кластеру.

На противагу цьому, при кластеризації і групуванні метою є виявлення та виділення класів. При групуванні добиваються розбиття елементів на групи, які незалежать від того, чи природні границі розбиття, чи ні [2]. Ціль полягає у виявленні груп однорідних об'єктів, які подібні поміж собою, проте

«сусідні» групи можуть не мати різних відмінностей. При цьому задача кластер-аналізу полягає у виявленні за емпіричними даними, наскільки елементи групуються або розпадаються на ізольовані скупчення, кластери [3]. Іншими словами, ціль – виділення груп однорідних об'єктів, які подібні поміж собою (як при групуванні), при різкій відмінності даних груп одна від одної (на відміну від групування).

Мета та задачі дослідження. Метою даної роботи є розробка методу ідентифікації та класифікації інформаційних сигналів (на прикладі графіку електричних навантажень – ГЕН) на основі ортогональних перетворень.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити модель інформаційного сигналу в ортогональному базисі;
- побудувати оптимальне дерево рішень із кореляцією частотно-просторових властивостей вейвлет-перетвореного сигналу;
- на їх основі розробити метод ідентифікації та класифікації інформаційного сигналу.

Матеріал та результати досліджень. У даній роботі розглядається метод класифікації інформаційних сигналів, при якому задача класифікації розбивається на два типи: із чітко розділеними кластерами (задача кластер-аналізу) і з умовними границями, які можуть безперервно переходити із одного в інший клас (задача групування).

Як показує аналіз наукових публікацій, існуючі методи ідентифікації та класифікації інформаційних сигналів або забезпечують задовільну точність, за умови досить складних алгоритмів їх використання, або на рівні зі швидкістю та простотою алгоритмів навпаки не дозволяють досягти заданої точності. Тобто, вони можуть застосовуватись для вирішення тих чи інших вибіркової задачі, але забезпечення оптимального співвідношення між точністю класифікації, швидкістю та простотою алгоритмів залишається досить складною проблемою.

Тому у даній роботі представлений метод класифікації інформаційних сигналів (на прикладі графіку електричних навантажень) на основі використання частотно-просторових властивостей вейвлет-перетворення. Алгоритм спрощується завдяки застосуванню оптимальної структури дерева рішень та енергетичних властивостей вейвлет-коефіцієнтів за рівнями декомпозиції (теорема Парсельваля). У той же час забезпечується висока точність та швидкість кластеризації та класифікації.

В основу розробленого методу кластеризації (класифікації) інформаційних сигналів покладено властивість частотно-просторового розподілення вейвлет-коефіцієнтів і відповідно їх енергії в залежності від структури інформаційного сигналу.

Як відомо, сімейство вейвлет-функцій $\left\{ \Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) \right\}_{j,k \in R}$ являє собою

ортонормований вейвлет-базис для $L^2(R)$ і, відповідно до положень теореми Фур'є, деталізуючи вейвлет-коефіцієнти $cD_j(k)$, які обчислюються як скалярний добуток інформаційного сигналу і вейвлет-функції $\langle f(t), \Psi(t) \rangle$, визначають енергію вейвлет-перетворення на кожному рівні вейвлет-декомпозиції $j = 1, 2, \dots, J = \log_2 N$, де N – протяжність вхідної реалізації сигналу, J – останній рівень вейвлет-декомпозиції. Тобто, енергія вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції запишеться так:

$$E_j = \sum_{k=0}^{2^j-1} |cD_j(k)|^2. \quad (1)$$

При цьому сумарна енергія сигналу буде визначатись як

$$E_{\text{сум}} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{2^j-1} |cD_j(k)|^2 = \sum_{j=1}^J E_j. \quad (2)$$

Для зручності проведемо нормалізацію енергії вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції до сумарної енергії сигналу

$$\{E_{\text{норм}}^j(E_j | E_{\text{сум}})\} = \frac{\sum_{k=0}^{2^j-1} |cD_j(k)|^2}{\sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{2^j-1} |cD_j(k)|^2}. \quad (3)$$

Тобто, у результаті отримуємо вектор розподілення нормалізованих значень енергії відповідних рівнів вейвлет-декомпозиції $\{E_{\text{норм}}^j\}_{j=1}^J = (E_{\text{норм}}^1, E_{\text{норм}}^2, \dots, E_{\text{норм}}^J)$.

Як було відмічено раніше, розподілення енергії за рівнями вейвлет-декомпозиції буде відповідати частотному представленню інформаційного сигналу і сума $\{E_{норм}^j\}_{j=1}^J = 1$. Даний показник [4] і буде основою для проведення ідентифікації та класифікації інформаційних сигналів. У 1948 році Шенон [5] ввів поняття ентропії як критерію для аналізу та порівняння правдоподібності розподілу ряду сигналів. Відповідно до [5], ентропію Шенона запишемо наступним чином

$$H(E_{норм}^j) = -\sum_{j=1}^J E_{норм}^j * \log(E_{норм}^j). \quad (4)$$

Значення ентропії $H(E_{норм}^j)$ (4) є мірою послідовності/непослідовності інформаційних сигналів.

Порівнево-ентропійний метод класифікації ГЕН (із введенням коригувальних коефіцієнтів центрів класу та його границь).

Метод класифікації інформаційних сигналів розроблено на основі синтезу використання частотно-просторових властивостей вейвлет-перетворення, алгоритму застосування оптимальної структури дерева рішень та енергетичних властивостей вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції.

Розроблений метод класифікації інформаційних сигналів представимо на прикладі аналізу трьох типових ГЕН (два з яких – робочі дні, інший – вихідний день, рис.1).

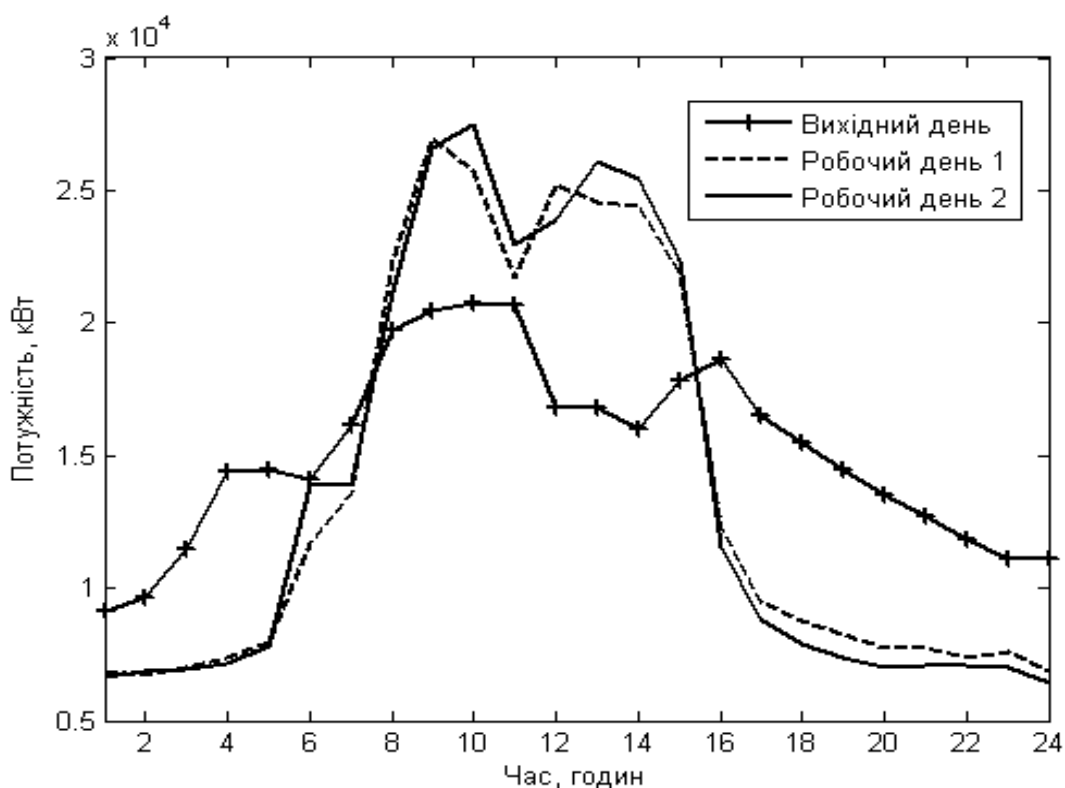


Рисунок 1 – ГЕН робочих (1, 2) та вихідного днів

Обчислимо середню енергію вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції відповідно до (1) і представимо на рис. 2 та розрахуємо відносні значення ентропій двох ГЕН [3]

$$H_1(E_{норм}^{1,сум} | E_{норм}^{2,сум}) = \sum_j E_{норм}^1 \log \left[\frac{E_{норм}^1}{E_{норм}^2} \right], \quad (5)$$

де $E_{норм}^{1,сум}$ та $E_{норм}^{2,сум}$ – сумарні нормалізовані значення ентропій першого та другого ГЕН відповідно.

За рівнянням (5) також розрахуємо відносні ентропії ГЕН № 1 до ГЕН № 3 ($H_2(E_{норм}^{1,сум} | E_{норм}^{3,сум})$) та ГЕН № 2 до ГЕН № 3 ($H_3(E_{норм}^{2,сум} | E_{норм}^{3,сум})$). Результати розрахунків наведено у таблиці 1.

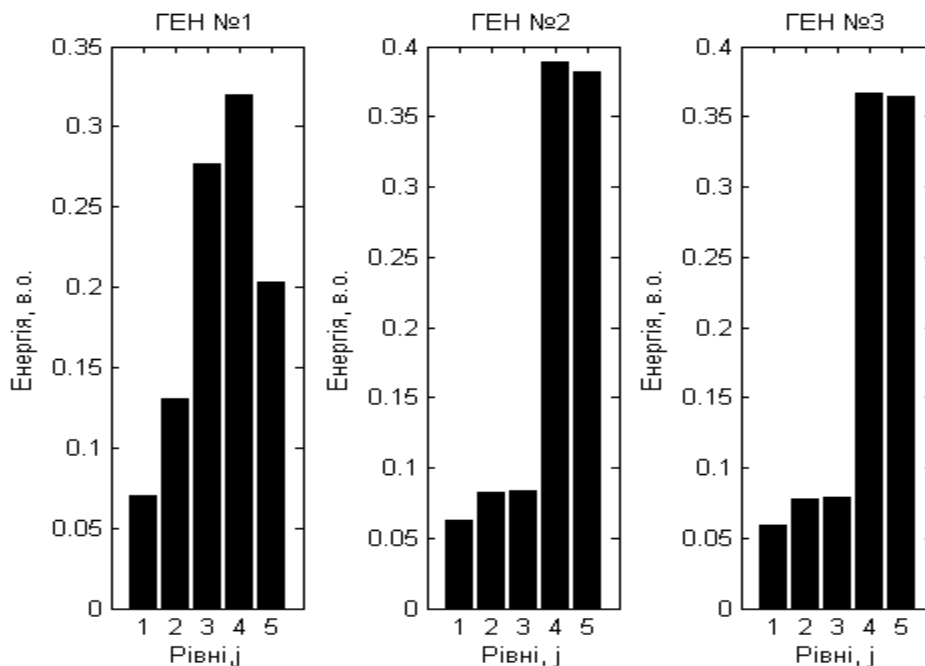


Рисунок 2 – Розподілення енергії вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції

Аналіз розподілень енергії за рівнями вейвлет-декомпозиції свідчить про подібність між ГЕН № 2 та ГЕН № 3. Також можна очікувати, що і значення їх ентропії будуть розташовані подібним чином, а саме

$$H_3(E_{\text{норм}}^{2,\text{сум}} | E_{\text{норм}}^{3,\text{сум}}) \approx 0 \text{ та } H_1(E_{\text{норм}}^{1,\text{сум}} | E_{\text{норм}}^{3,\text{сум}}) > 0.$$

Таблиця 1 – Розрахункові значення ентропії сигналів

Тип ГЕН	Сумарне значення ентропії, відод.	Відносні значення ентропії
ГЕН № 1	1,3225	$H_1(E_{\text{норм}}^{1,\text{сум}} E_{\text{норм}}^{3,\text{сум}}) = 0,237$
ГЕН № 2	1,2989	$H_3(E_{\text{норм}}^{2,\text{сум}} E_{\text{норм}}^{3,\text{сум}}) = 0,0027$
ГЕН № 3	1,4950	$H_2(E_{\text{норм}}^{1,\text{сум}} E_{\text{норм}}^{2,\text{сум}}) = 0,206$

Як видно з табл. 1, відносні значення ентропії подібних ГЕН (№ 2 та № 3) близькі до нульового (0,0027), а відносне значення ентропії ГЕН № 1 до ентропії ГЕН № 3 та ГЕН № 2 значно більше нульового значення (0,206 та 0,237 відповідно).

Для розробки правил ідентифікації та класифікації інформаційних сигналів (тобто, встановлення еталонних (базових) значень ентропії у кожному класі $\{E_{\text{баз}}^i\}_{i=1}^n$, де n – кількість класів, та їх границь $\{\pm \Delta E_{\text{баз}}^i\}_{i=1}^n$) використано результати, наведені у [6]. Тобто, застосування методу класифікації інформаційних сигналів на основі побудови оптимального дерева рішень дозволило розбити ГЕН промислового підприємства на дванадцять класів, чотири із яких є основними. Розрахунки були проведені на основі аналізу 120 типових ГЕН та розрахованих їх ентропій за рівнями вейвлет-декомпозиції.

Із вибірок даних класів було сформовано базову вибірку (як середньоарифметичне значення всіх вибірок, які входять у даний клас). Потім для кожної базової (еталонної) вибірки розраховано сумарну ентропію $\{E_{\text{баз}}^k\}_{k=1}^{12}$ відповідно до (2), та встановлено границі класів $\{\Delta E_{\text{баз}}^k\}_{k=1}^{12}$ (12 – кількість вибірок у одному класі) таким чином, щоб

$$(E_{\text{баз}}^{i+1} + \Delta E_{\text{баз}}^{i+1}) < (E_{\text{баз}}^i - \Delta E_{\text{баз}}^i) \cap (E_{\text{баз}}^i + \Delta E_{\text{баз}}^i) < (E_{\text{баз}}^{i-1} + \Delta E_{\text{баз}}^{i-1}). \quad (6)$$

Тобто, створено базу даних сегментовану на класи із відповідним значенням базової ентропії (центр класу та його границі)

$$\{\Omega_i(E_{\text{баз}}^i, \pm \Delta E_{\text{баз}}^i)\}_{i=1}^n, \quad (7)$$

де n – кількість класів. На рис. 3 представлено структурно-функціональну модель формування базових вибірок значень ентропії та їх границь.

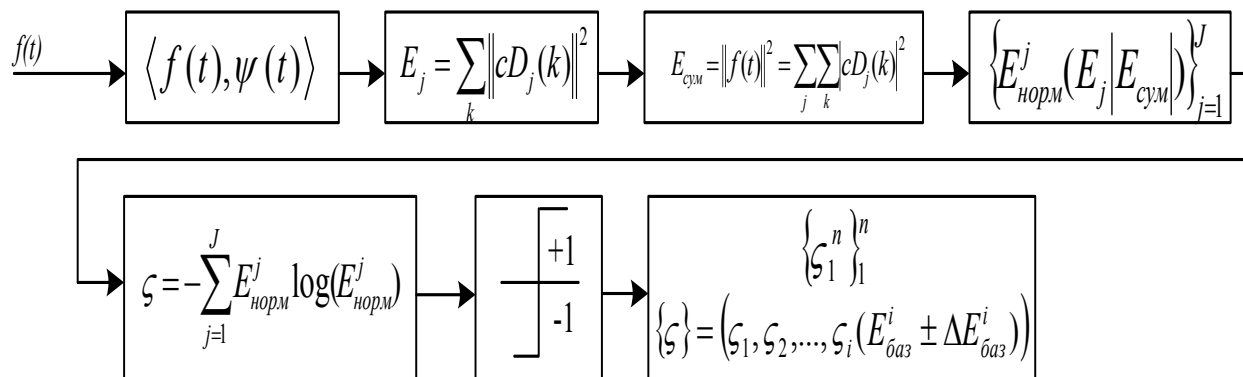


Рисунок 3 – Структурно-функціональна модель побудови бази еталонних значень ентропії (центрів класів та їх границь) для проведення класифікації інформаційних сигналів

Такий розрахунок був проведений для трьох основних класів ГЕН промислового підприємства. Його результати представлені у таблиці 2 та на рис. 4 (класи № 1 – № 3).

Таблиця 2 – Результати формування класів ГЕН промислового підприємства

Номер класу (тип)	Значення $\{E_{\text{баз}}^i\}_{i=1}^n$	Значення $\{\Delta E_{\text{баз}}^k\}_{k=1}^{12}$
Клас № 1	1,65	0,09
Клас № 2	1,4	0,13
Клас № 3	1,1	0,17

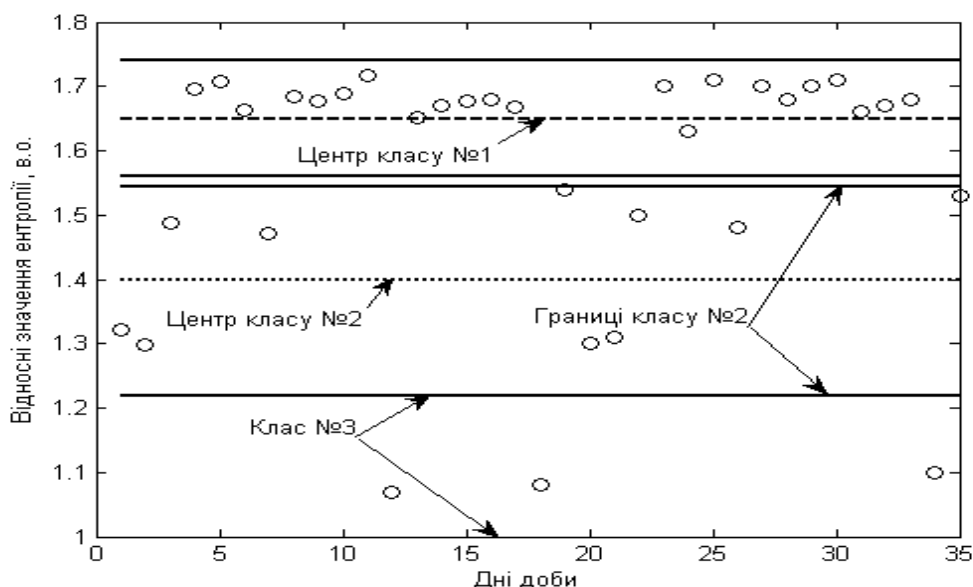


Рисунок 4 – Результати кластеризації ГЕН за методом відносної ентропії за рівнями вейвлет-декомпозиції

На рис. 5 представлений алгоритм проведення класифікації інформаційних сигналів за методом відносної ентропії за рівнями вейвлет-декомпозиції у вигляді псевдокоду.

```

for ( $E_{\delta a3}^i - \Delta E_{\delta a3}^i \leq E_{\text{сум}}^m \leq (E_{\delta a3}^i + \Delta E_{\delta a3}^i)$ )
     $E_{\text{сум}}^m \in \Omega_k$ 
else
    for ( $E_{\delta a3}^{i+1} - \Delta E_{\delta a3}^{i+1} \leq E_{\text{сум}}^m \leq (E_{\delta a3}^{i+1} + \Delta E_{\delta a3}^{i+1})$ )
         $E_{\text{сум}}^m \in \Omega_{k+1}$ 
        else
            .....
            for ( $E_{\delta a3}^n - \Delta E_{\delta a3}^n \leq E_{\text{сум}}^m \leq (E_{\delta a3}^n + \Delta E_{\delta a3}^n)$ )
                else
                    формується новий клас
                end
            end
        end
    end
end
end

```

Рисунок 5 – Псевдокод віднесення ГЕН до визначеного класу на основі аналізу енергії вейвлет-коефіцієнтів (відносної ентропії)

Проведено порівняльні експерименти застосування розробленого методу класифікації у випадках розрахунків відносної ентропії за рівнями вейвлет-декомпозиції для вейвлет-аналізу за допомогою алгоритму Малла, пакетного вейвлету та оптимального дерева рішень. На рис. 6 наведено структурно-функціональну схему порівняльного аналізу якості класифікації інформаційних сигналів.

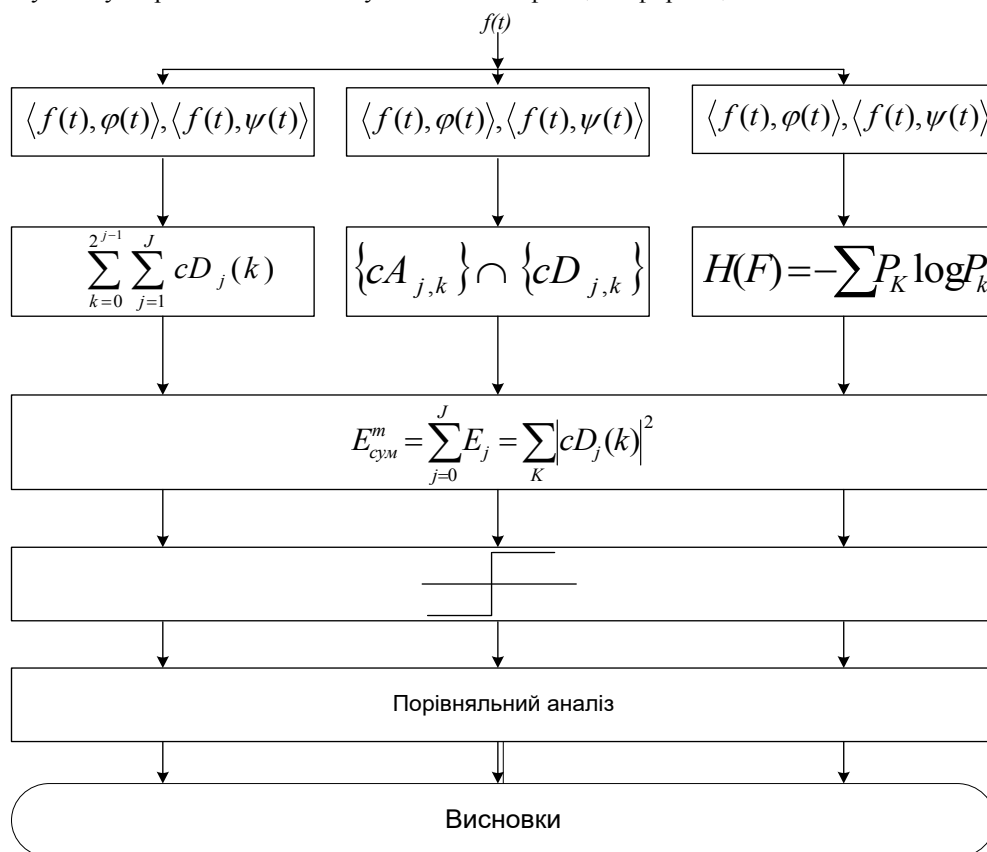


Рисунок 6 – Структурно-функціональна схема порівняльного аналізу якості класифікації інформаційних сигналів за методом відносної ентропії за рівнями вейвлет-декомпозиції

Для порівняльного аналізу було обрано по одному із представників основних двох класів кластеризації (вихідний день – ГЕН № 1, та робочий – ГЕН № 2). Результати аналізу зведені у табл. 3.

Результати такого порівняльного аналізу показали найвищу точність класифікації при застосуванні пакетного вейвлет-аналізу (~ 0,5 % похибок першого роду для ГЕН № 1 та ГЕН № 2, та від 0,3 % до 0,8 % похибок другого роду (при 0,9 % та 0,96 % відповідно для випадку застосування оптимального дерева рішень). Але побудова оптимального дерева рішень суттєво зменшує вплив шумових компонент при застосуванні порогових значень (похибки класифікації як першого, так і другого роду зменшуються на ~ 30 % по відношенню до пакетного вейвлету).

Таблиця 3 – Результати порівняльного аналізу впливу методу проведення вейвлет-декомпозиції інформаційного сигналу на точність класифікації за допомогою методу відносної ентропії за рівними вейвлет-декомпозиціями.

Тип вейвлет-аналізу	Тип ГЕН					
	ГЕН № 1/№2					
	Енергія сигналу $E_{f(t)}, *10^8$	Відносна ентропія	Помилка класифікації, %			
			I роду		II роду	
Без шуму			Шум, 15%	Без шуму	Шум, 15%	
Алгоритм Малла	1,157/ 1,756	1,7085/ 1,179	1,8±0,5/ 2,1±0,6	2,7±0,4/ 3,5±0,4	2,6/ 1,6±0,34	3,1±0,45/ 3,8±0,5
Пакетний вейвлет	0,9149/ 2,27	1,7758/ 1,4826	0,5±0,1/ 0,54±0,1	1,8±0,12/ 1,6±0,9	0,3±0,1/ 0,76±0,23	1,86/ 2,09±0,7
Оптималь-не дерево рішень	1,5077/ 2,242	1,7040/ 1,6668	0,9±0,4/ 0,96±0,21	1,2±0,08/ 1,37±0,42	0,9±0,2/ 0,92±0,31	1,1±0,16/ 1,72±0,9

Проведено також дослідження точності класифікації інформаційних сигналів за методом відносної ентропії за рівними вейвлет-декомпозиції в залежності від способу формування бази еталонних значень ентропій (центрів класів та їх границь). Розглянуто три способи такого формування. Перший з яких передбачає формування еталонних значень на стадії кластеризації і формування нових еталонних значень центру класу та його границь (рис. 7, а) наприкінці місяця. Другий метод полягає у формуванні еталонних значень на стадії кластеризації на основі ГЕН за шість місяців (рис. 7, б) і корекції після шістьох місяців. При третьому способі формування еталонних значень на стадії кластеризації проводиться на основі ГЕН за шість місяців (рис 7, в), і еталонні значення коригуються щодня.

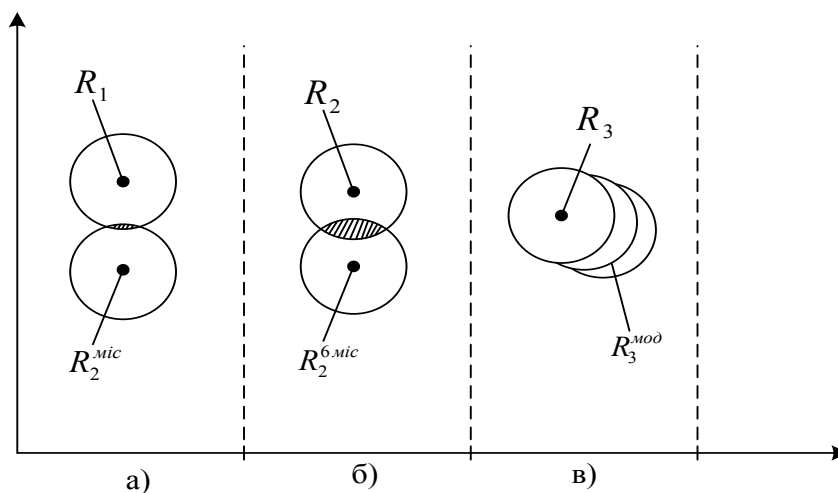


Рисунок 7 – Модифікація характеристик кластерів із часом

$R_1^{mic}, R_2^{6mic}, R_3^{mod}$ – еталонні центри кластерів

Аналіз результатів проведених досліджень дозволяє стверджувати наступне. По-перше, чим більша кількість базових вибірок, тим ефективнішим є застосування еталонної вибірки для формування еталонних характеристик кластерів і, як наслідок, тим вищою є точність подальшої класифікації. По-друге, за необхідності отримання високої точності класифікації інформаційних сигналів коригування характеристик кластерів повинно проводитись безперервно, у темпі отримання поточних даних (для ГЕН це – одна доба). По-третє, на основі аналізу коригувального процесу характеристик кластерів у залежності від необхідної похибки потрібно модифікувати цей процес у реальному режимі часу.

Висновки

1. Розроблений метод класифікації інформаційних сигналів на основі синтезу використання частотно-просторових властивостей вейвлет-перетворення, алгоритму застосування оптимальної структури дерева рішень та енергетичних властивостей вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції забезпечує високу точність та швидкодію. Точність класифікації залежить як від кількості базових вибірок, так і від способу коригування еталонних характеристик кластерів.

2. Застосування пакетного вейвлет-базису призводить до найвищої точності класифікації (помилка до $\pm 0,5\%$), алгоритму Малла – до найбільш швидкої класифікації (швидкість збільшується \sim у 3 рази порівняно із пакетним вейвлет-базисом). Використання методу класифікації на основі відносної ентропії за рівнями вейвлет-декомпозиції з використанням оптимального дерева декомпозиції завдяки стійкості його рішень до наявності шумових компонент у поєднанні із високою точністю та швидкодією є найбільш придатним для класифікації інформаційних сигналів.

3. Підвищення точності класифікації інформаційних сигналів методом відносної ентропії на основі застосування оптимального дерева рішень досягається підвищенням об'єму базових вибірок та адаптивним коригуванням еталонних характеристик кластерів.

Список літератури.

1. Орлов А.И. Статистические методы и анализ данных// Социология. – 1991.- № 2. - С. 28 – 49.
2. А.В. Гармаш Лекция 13. Методы классификации и идентификации. Распознавание образов. - <http://chemstat.com.ru/node/13/>
3. Дж. Вэн Райзин. Классификация и кластер. Перевод с английского П.П.Кольцова под редакцией Ю.И.Журавлева// Издательство. – М.:Мир, 1980. – 389 с.
4. Daniuseviciute L. Wavelet-based Entropy Analysis of Electromyography during 100 Jumps/L. Daniuseviciute, K. Pukenas, A. Skurvydas // Electronics and Electrical Engineering. – 2010. – № 8 (104). – P. 93 – 96.
5. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / Изд-во иностр. Литературы. – Москва. – 1963. – 832 с.
6. Волошко А.В. Метод класифікації інформаційних сигналів за допомогою побудови оптимального дерева вейвлет-перетворення/А.В. Волошко, Т.М. Лутчин, Д.Ю. Терещенко// Енергетика, екологія. Людина. - 2012. С. 81 – 85.

A.V. Voloshko

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnical Institute»

CLASSIFICATION OF INFORMATION SIGNALS RELATIVE ENTROPY OF THE LEVELS OF WAVELET DECOMPOSITION

Relevance of work due to the fact that since the schedule of electric load is a realization of a random process, its identification must be a timetable in deterministic and random components. The most appropriate mathematical apparatus is currently the orthogonal transformation. Among them is the most widely used wavelet analysis. This paper presents the method of identification and classification of information signals (for example, graphics electrical loads) the relative entropy of the levels of wavelet decomposition.

Key words: electric load schedule, identification, classification, entropy, wavelet analysis.

References

1. Orlov A.I. Statistical Methods and Data Analysis //Soziologiya. – 1991. - № 2. – p. 28 – 49.
2. Garmash A.V. Metodu klasyfikacyji i identyfikacyji. Raspoznavanie obrazov. - <http://chemstat.com.ru/node/13/>.
3. Raiyzin D.V. Classification and cluster. Perevod s angliyskogo P.P. Kolzova pod redakciey Yo. I. Yuravleva// Izdat. Mir.:Moskva.-1980. – 340 p.
4. Daniuseviciute L. Wavelet-based Entropy Analysis of Electromyography during 100 Jumps/L. Daniuseviciute, K. Pukenas, A. Skurvydas // Electronics and Electrical Engineering. – 2010. – № 8 (104). – P. 93 – 96.
5. Shenon K. Works on information theory and cybernetics /Isd – vo inostr. Literatury. - :Moskva. – 1963. – 832 p.
6. Voloshko A.V. The method of classification of information signals by constructing optimal tree wavelet transform /A.V. Voloshko, T.M. Lutchin, D.Yu. Terecschenko//Energetika, ekologiya. Chelovek. – 2012. – s. 81 – 85.

Надійшла 15.10.2015

Received 15.10.2015

О.Ф. Буткевич¹, докт. техн. наук, В.В. Чижевський²

¹ – Інститут електродинаміки НАН України

² – Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут»

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗАПОБІГАННЯ КОЛИВНОМУ ПОРУШЕННЮ СТІЙКОСТІ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Викладено деякі особливості побудови інтегрованої системи демпфування (ІСД) електромеханічних низькочастотних коливань (НЧК) в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України. Джерелом інформації для ІСД НЧК є програмні засоби ідентифікації домінуючих мод НЧК. Такі засоби в режимі реального часу оцінюють небезпеку коливного порушення стійкості ОЕС. Первинним джерелом інформації для ІСД НЧК є пристрої векторних вимірювань. Показано, що селекція методів аналізу сигналів, придатних для використання в ІСД НЧК, базується на всебічному тестуванні цих методів.

Ключові слова: об'єднана енергосистема, електромеханічні низькочастотні коливання, демпфування, пристрій векторних вимірювань, методи аналізу сигналів.

Вступ. Об'єднанням енергосистемам (ОЕС), до яких належать і транснаціональні енергооб'єднання (ЕО), властиве виникнення внутрішньосистемних та міжсистемних низькочастотних електромеханічних коливань (НЧК). Такі НЧК пов'язані з наявністю у складі коливань режимних параметрів низькочастотних (до 1 Гц) складових вільних коливань (мод), обумовлених коливаннями у протифазі на власних частотах ОЕС роторів певних груп синхронних генераторів (СГ). Амплітуди зазначених складових коливань можуть збільшуватися як у разі значних збурень режиму, так і у разі дії навіть малих збурювальних сил, періодична зміна яких відбувається з частотами, що відповідають власним частотам ОЕС (такі частоти називатимемо *модальними*). Небезпечно зростання амплітуд НЧК та їх поширення в ОЕС може призводити до вимкнення ліній електропередачі, блоків електростанцій, знеструмлення споживачів електроенергії. Логічним наслідком посилення таких НЧК є коливне порушення стійкості ОЕС.

Дослідженню умов виникнення та питань ідентифікації і демпфування НЧК присвячено численні публікації, наприклад [1-6], однак сама проблематика залишається актуальною протягом досить тривалого часу, оскільки в ОЕС в різних частинах світу, зокрема і в енергооб'єднанні країн Європи (ENTSO-E), час від часу виникають аварії, “ініційовані” НЧК, наслідками яких є значні економічні збитки.

Для ОЕС України проблема демпфування небезпечних НЧК набуде особливої актуальності у разі її переходу до паралельної роботи з ENTSO-E, оскільки у “розширеному” (за рахунок ОЕС України) ENTSO-E з'являться і додаткові групи СГ, і додаткові слабкі електричні зв'язки, тому у разі “розширеного” ENTSO-E зазнають певних змін як параметри, так і склад домінуючих мод НЧК. В окремих частинах ENTSO-E це викличе потребу певного переналаштування засобів демпфування НЧК, до яких, крім системних стабілізаторів (PSS) у складі систем автоматичного керування збудженням (САКЗ) СГ, належить ряд інших засобів, зокрема гнучкі системи передачі змінного струму – *FACTS* (аббревіатура від *Flexible Alternating Current Transmission System*), функціональні можливості яких не обмежуються демпфуванням НЧК.

Наразі ОЕС України ще не готова до паралельної роботи з ENTSO-E (“Бурштинський острів” не слід брати до уваги: це лише виокремлена частинка ОЕС України з модернізованими системами регулювання на електростанції, яка, крім СГ, має і асинхронізовані турбогенератори), і, на відміну від того ж ENTSO-E, єдиними засобами демпфування НЧК в ОЕС України залишаються САКЗ СГ з автоматичними регуляторами збудження сильної дії, хоча вже з'являються і САКЗ інофірм-виробників з конструктивно незалежними регуляторами напруги (AVR) та PSS. За таких умов, не дуже сприятливих для вирішення зазначеної проблеми з точки зору наявних технічних можливостей, слід забезпечити готовність ОЕС України до запобігання системним аваріям, пов'язаним з виникненням НЧК, ще до її переходу на паралельну роботу з ENTSO-E.

Мета та завдання статті. Метою даної статті є висвітлення окремих результатів виконаних досліджень, підпорядкованих вирішенню проблеми запобігання коливному порушенню стійкості ОЕС, загроза якого обумовлюється виникненням небезпечних для функціонування ОЕС НЧК.

Матеріал і результати досліджень.**Демпфування небезпечних для функціонування ОЕС НЧК на базі інтегрованої системи.**

Незалежно від наявних в ОЕС засобів автоматичного демпфування НЧК та їх ефективності, інформація щодо виникнення загрози коливного порушення стійкості ОЕС є вкрай важливою для диспетчерського персоналу ОЕС. Дані щодо випадків виникнення НЧК в ОЕС свідчать, що тривалість процесів зростання амплітуди НЧК до небезпечних для функціонування ОЕС значень іноді може вимірюватися хвилинами, а в окремих випадках і десятками хвилин, наприклад [5]. За таких умов своєчасна ідентифікація небезпечних НЧК дозволить диспетчерському персоналу вжити необхідних заходів, щоб запобігти аварійному розвитку подій.

Вирішенню проблеми демпфування небезпечних для функціонування ОЕС НЧК сприяє використання технології векторних вимірювань, реалізованої на рівні об'єктів ОЕС пристроями векторних вимірювань напруги, відомих за англійською аббревіатурою *PMUs* (від *Phasor Measurement Units*). Вітчизняним аналогом кращих світових зразків *PMUs* є розроблений в Інституті електродинаміки НАН України і впроваджуваний в ОЕС України електровимірювальний ресструвальний прилад (ЕВРП) "Регіна-Ч". Для ефективного демпфування небезпечних для функціонування ОЕС НЧК потрібно створити з використанням ЕВРП "Регіна-Ч" інтегровану систему демпфування (ІСД) НЧК у вигляді трьох складових, які умовно можна назвати *превентивною*, *автоматичною* та *оперативною*. Джерелом інформації для усіх трьох складових є засоби ("інформаційне ядро"), що використовують в режимі *on-line* попередньо опрацьовані методи аналізу сигналів – вимірюваних ЕВРП "Регіна-Ч" параметрів режиму ОЕС. Мета такого аналізу – виявлення домінантних мод НЧК, визначення їхніх параметрів та оцінювання небезпека коливного порушення стійкості ОЕС. У разі існування такої небезпеки відповідна інформація надається вищезазначеним складовим ІСД НЧК. Слід зауважити, що безпосереднє застосування в режимі *on-line* з цією ж метою (визначення параметрів домінантних мод) традиційного для режиму *off-line* підходу, який передбачає використання математичної моделі ОЕС (у вигляді системи лінеаризованих рівнянь динаміки ОЕС) та апарату модального аналізу, потребує забезпечення адекватності математичної моделі ОЕС та відповідності її параметрів поточному стану ОЕС, що в аспекті практичного виконання є досить проблематичним завданням.

Вищезазначені три складові ІСД НЧК підпорядковано розв'язанню задач однієї проблеми, але у різному вимірі часу. Засоби *автоматичної* складової в реальному часі автоматичного керування визначають і реалізують керівні впливи (сигнали) для демпфування небезпечних НЧК (ця складова ІСД, за сутністю, є інтегрованою системою керування САКЗ СГ, окремі питання побудови та функціонування якої розглянуто в [7]). Засоби *оперативної* складової ІСД НЧК інформують диспетчерський персонал ОЕС і надають йому рекомендації щодо оперативної реалізації керуючих дій, спрямованих на "знесення" НЧК (наприклад, перерозподіл навантаження відповідних СГ електростанцій) на випадок, якщо дії САКЗ СГ (елементів *автоматичної* складової ІСД НЧК) щодо демпфування НЧК виявляться недостатньо ефективними. Для надання адекватних рекомендацій диспетчеру засоби *оперативної* складової ІСД НЧК також опрацьовуватимуть поточну інформацію щодо стану ОЕС, одержувану від наявної в центрі диспетчерського керування системи моніторингу. Інформація, що стосується визначених параметрів домінантних мод НЧК, надходить від *оперативної* складової ІСД НЧК до *превентивної* складової, засобами якої в режимі *off-line* визначають вірогідні умови виникнення небезпечних НЧК (для знаходження причинно-наслідкових зв'язків залучають також всю наявну інформацію щодо стану ОЕС, за якого виникають небезпечні НЧК), щоб їх уникнути (враховуючи) ще на етапі планування режимів, а також готують необхідні інструктивні матеріали для їх використання засобами *оперативної* складової ІСД НЧК, яка виконуватиме функції дорадника диспетчера щодо його дій у разі виникнення НЧК.

Однією із умов забезпечення ефективності ІСД НЧК є мінімізація витрат часу, пов'язаного з ідентифікацією домінантних мод НЧК та оцінюванням загрози коливного порушення стійкості ОЕС. Оскільки характеристики використовуваних в ОЕС України каналів передавання інформації далекі від бажаних (в аспекті забезпечення можливості розв'язання низки актуальних задач керування ОЕС), то для мінімізації загальних витрат часу, пов'язаних з оцінюванням небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС, засоби вищезазначеного "інформаційного ядра" (у вигляді рівноправних примірників) повинні знаходитися на верхньому, "серверному" рівні приладів "Регіна-Ч", встановлених на різних об'єктах ОЕС. Ці засоби являють собою програмну реалізацію ансамблю визначених в результаті досліджень методів аналізу сигналів і забезпечують надійне оцінювання небезпеки виникнення НЧК, які можуть призвести до коливного порушення стійкості ОЕС (саме ці засоби, що функціонують в режимі реального часу, є тим "інформаційним ядром", яке на базі спільної інформації об'єднує складові ІСД НЧК в одну систему). Такі засоби визначають в реальному часі показники демпфування домінантних мод коливань. Результати оцінювання надходять від "інформаційного ядра" ("серверний" рівень ЕВРП "Регіна-Ч") в "Концентратор-аналізатор", який одночасно є і керуючим ядром розподіленої *автоматичної* складової ІСД НЧК, що виконує кілька функцій: 1) визначає потребу введення керуючих дій (сигналів) в САКЗ певних СГ електростанцій для демпфування виявлених домінантних мод коливань (визначення "адрес" потрібних СГ

здійснюється на підставі “географії” знаходження відповідного “інформаційного ядра” ІСД НЧК, засоби якого виявили небезпечні домінантні складові НЧК); 2) формує та надсилає сигнали керування для демпфування домінантних складових НЧК; 3) передає засобом *оперативної* складової ІСД НЧК всю необхідну інформацію щодо виявлених небезпечних домінантних мод НЧК. Загальну структуру ІСД НЧК показано на рис. 1, де позначено:

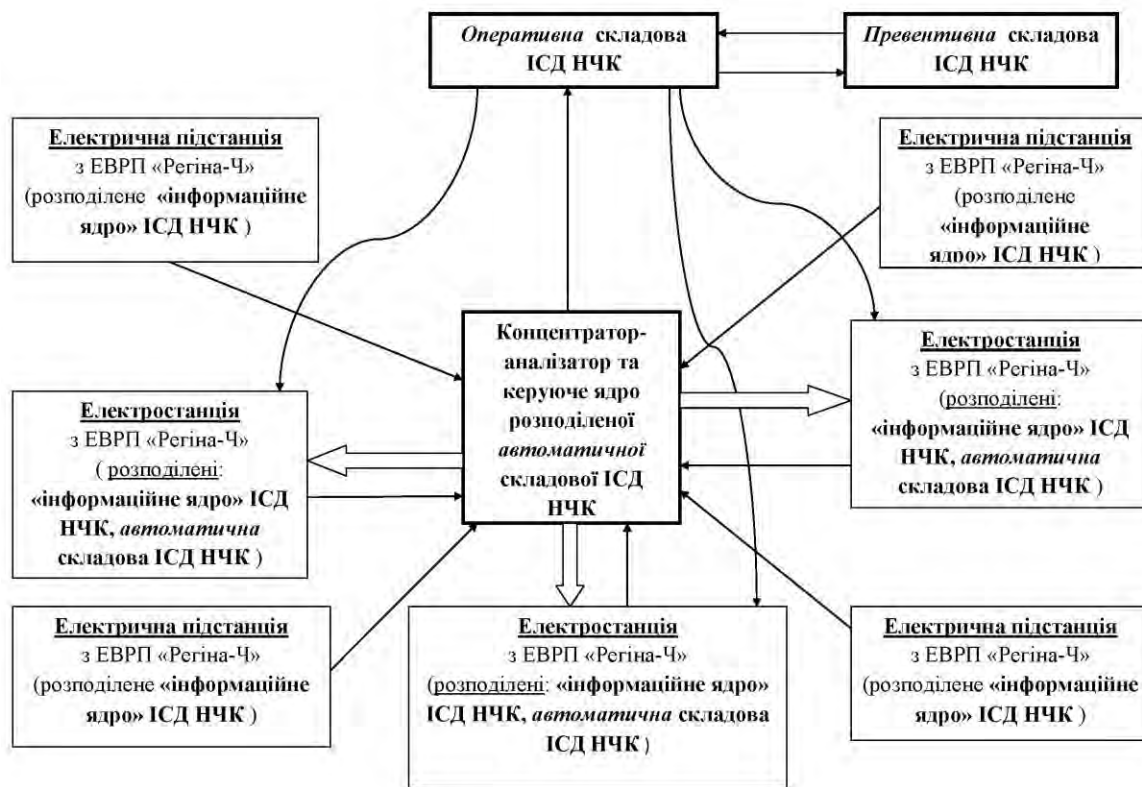


Рисунок 1 – Загальна структура ІСД НЧК

1) тонкими прямими зі стрілками – напрями передавання інформації щодо визначених параметрів домінантних мод НЧК (виняток становить пряма зі стрілкою у напрямі від *превентивної* до *оперативної* складової, якою позначено надходження інструктивних матеріалів щодо дій з демпфування відповідних складових НЧК за конкретних схемо-режимних умов); 2) широкими стрілками – керівні сигнали ядра *автоматичної* складової ІСД НЧК; 3) непрямыми лініями зі стрілками – керівні дії диспетчерського персоналу, що використовує інформацію *оперативної* складової ІСД НЧК.

На електростанціях “виконавчими елементами” розподіленої *автоматичної* складової ІСД НЧК є САКЗ СГ, причому, можливі варіанти САКЗ як з PSS, так і з модульно-фазовим автоматичним регулятором збудження [7, 8].

Засоби “інформаційного ядра” ІСД НЧК

Під час розв’язання різних прикладних задач, пов’язаних з обробленням сигналів, широко використовують методи спектрального аналізу. Таке використання є коректним по відношенню до стаціонарних випадкових процесів, тривалість яких не обмежена. Що ж стосується процесів, пов’язаних з функціонуванням ОЕС, то їх можна вважати стаціонарними лише на окремих часових відрізках. Це викликає і певні обмеження щодо застосування методів спектрального аналізу під час розв’язання задач, пов’язаних з аналізом процесів в ОЕС. Не дивлячись на те, що процеси, внаслідок яких виникають НЧК ОЕС, у більшості випадків є нелінійними і нестационарними, в практиці експлуатації ОЕС для ідентифікації та визначення параметрів домінантних мод НЧК широко використовують різні методи аналізу сигналів (зокрема і в режимі реального часу), більшість з яких не орієнтовано на оброблення даних, що стосуються нелінійних і нестационарних процесів. Засоби “інформаційного ядра” повинні забезпечувати надійність та адекватність ідентифікації та визначення параметрів домінантних мод НЧК в режимі *on-line*. Далеко не всі методи аналізу сигналів придатні для використання в ІСД НЧК. В [9] наведено окремі результати досліджень низки методів, які свідчать, що кращими в аспекті розв’язання поставленої задачі виявилися такі: найменших квадратів Ганкеля (МНКГ), пучка матриць та Проні

модифікований. Певною “універсальністю” серед методів аналізу сигналів вирізняється метод (перетворення) Гільберта-Хуанга (ПГХ) – комбінація емпіричного методу розкладання Хуанга та спектрального аналізу Гільберта, який, на відміну від інших, придатний для аналізу нестационарних і нелінійних процесів (сигналів) [10-12]. З урахуванням цієї обставини та результатів виконаного тестування, ПГХ теж введено до складу ансамблю відібраних методів, що входять до “інформаційного ядра” ІСД НЧК. Тут слід підкреслити, що відбору кожного із методів (відповідних програмних засобів) для застосування у складі “інформаційного ядра” передувала їх всебічна перевірка. Крім використання результатів реальних вимірювань параметрів режиму, одержаних від ЕВРП “Регіна-Ч”, для зазначеної перевірки було також синтезовано різні тестові сигнали, що містили низькочастотні складові (зокрема і близькі за частотами), які призводили до зростання амплітуди коливань результуючого сигналу. Нижче розглянемо один із таких сигналів та результати його аналізу з використанням ПГХ.

Аналіз тестового сигналу з використанням ПГХ

Тестовий сигнал, як і одержувані від ЕВРП “Регіна-Ч” результати синхронізованих вимірювань режимних параметрів, подавався у вигляді вибірки дискретних значень. До складу синтезованого сигналу було введено складові з частотами $0,05 \text{ Гц}$, $0,09 \text{ Гц}$ та $1,2 \text{ Гц}$, а також складову основної частоти (50 Гц) та дві складові з частотами 150 і 250 Гц . Крім того, до складу сигналу вводився білий шум (БШ), максимальний рівень якого не перевищував 5% від амплітуди складової основної частоти. Амплітуда складової, що відповідала частоті 50 Гц , залишалася незмінною на часових відрізках $[0, 10,0] \text{ с}$ та $[10,5, 20] \text{ с}$, а в інтервалі $[10,0, 10,5] \text{ с}$ вона змінювалася за законом $A(t) = 1 + 0,5 \sin(2\pi(t-10))$. Частота основної складової сигналу змінювалася протягом 20 с від 50 до 49 Гц лінійно. Графіки зміни амплітуд окремих складових тестового сигналу (за винятком складової основної частоти) показано на рис. 2, де, залежно від частоти складових, використано різні лінії: для $0,05 \text{ Гц}$ – суцільна лінія, для $0,09 \text{ Гц}$ – штрихова, для $1,2 \text{ Гц}$ – штрих-пунктирна, для 150 Гц та 250 Гц – пунктирна лінія.

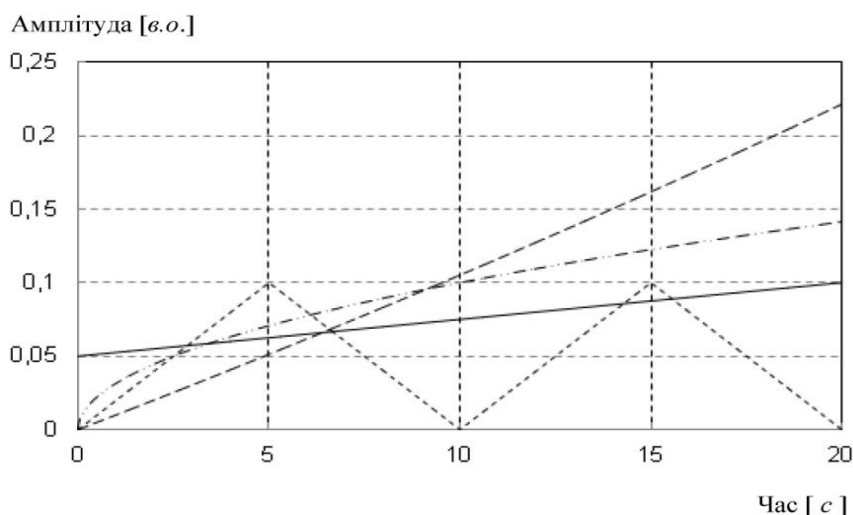


Рисунок 2 – Зміна амплітуд складових тестового сигналу

Відразу зазначимо, що оскільки ставилася задача виявлення у тестових сигналах насамперед низькочастотних складових, то під час оброблення вибірки даних цього сигналу високочастотні складові з частотами 150 та 250 Гц було “вилучено” за допомогою обмежуючого фільтра. Під час аналізу тестових сигналів перевірявся вплив кількох чинників (частоти дискретизації, яка використовується під час формування вибірки даних, ширини вікна стеження та його зсуву) на результати ідентифікації складових сигналу.

Аналіз тестового сигналу з використанням ПГХ

Перетворення Гільберта-Хуанга дозволяє використовувати його для дослідження нестационарних процесів, якими є режими функціонування ОЕС. Сутність методу розкладання певного сигналу $x(t)$ на емпіричні моди полягає у послідовному розрахунку емпіричних мод c_j та залишків $r_j = r_{j-1} - c_j$, де $j = \overline{1, n}$; $r_0 = x(t)$. Результат такого розкладання можна подати у вигляді (1)

$$x(t) = \sum_{i=1}^{i=n} c_i(t) + r_n(t), \quad (1)$$

де n – кількість емпіричних мод, що встановлюється під час обчислень.

Перетворення Гільберта-Хуанга у порівнянні, наприклад, з методом Проні, дозволяє забезпечити високу швидкодню відповідних обчислювальних процедур, однак має і суттєвий недолік – точність перетворення за частотою f_p [Гц] залежить від ширини вікна стеження t_b [с]: $f_p \approx (t_b)^{-1}$. Тобто, для того, щоб можна було виявити складову, якій відповідає частота 0,09 Гц, ширина вікна стеження повинна бути не меншою від 11,1... с, а для виявлення складової, якій відповідає частота 0,05 Гц, потрібно мати ширину вікна стеження не меншою 20 с. За меншої ширини вікон стеження виявлення зазначених складових не гарантовано. Наприклад, у разі використання вікна стеження шириною у 10 с повинно забезпечуватися виявлення складової, якій відповідає частота 1,2 Гц, також існує ймовірність виявлення складової, якій відповідає частота 0,09 Гц, оскільки значення ширини вікна у 10 с близьке до 11,1...с, однак надія виявлення складової, якій відповідає частота 0,05 Гц, є досить примарною. Такі попередні судження підтверджуються основними результатами аналізу тестової вибірки, наведеними в табл. 1 для випадку, коли ширина та зсув вікна стеження становили відповідно 10 с та 1 с (частину інформації, що міститься у стовпцях “Сміття”, в табл. 1 не наведено). У стовпці “Час” вказано час [с], що відповідає середині кожного вікна стеження. У стовпцях “Частоти”, позначених числами, що відповідають значенням частот [Гц] складових тестового сигналу, які підлягають виявленню (50 → 49; 1,2; 0,09; 0,05), містяться значення “виявлених” (визначених) частот (“Визначена частота” [Гц]) та амплітуд (“Амплітуда” [в.о.] відповідних складових сигналу. Разом з тим, під час оброблення вибірки даних було одержано хибні компоненти (назвемо їх обчислювальним “сміттям”), які не є складовими тестового сигналу, відповідна інформація щодо них знаходиться у стовпцях “Сміття”.

Таблиця 1 – Визначені параметри виявлених складових сигналу з використанням ПГХ

Час	Частоти						«Сміття»	
	50 → 49		1,2		0,09		Визначена частота	Амплітуда
	Визначена частота	Амплітуда	Визначена частота	Амплітуда	Визначена частота	Амплітуда		
5	49.773	1	0.950	0.061	-	-	3.000	0.056
6	49.700	1	1.087	0.052	0.092	0.043	3.894	0.029
7	49.664	1	-	-	0.092	0.036	2.541	0.062
8	49.600	1	1.282	0.086	-	-	1.053	0.081
9	49.536	1	1.243	0.081	-	-	3.199	0.068
10	49.500	1	1.199	0.093	-	-	0.188	0.072
11	49.436	1	1.432	0.102	-	-	0.150	0.061
12	49.400	1	1.277	0.105	0.092	0.024	0.191	0.063
13	49.365	1	1.282	0.110	0.100	0.060	0.192	0.045
14	49.300	1	1.347	0.118	0.092	0.063	1.050	0.109
15	49.246	1	1.351	0.119	-	-	1.044	0.125

Як і очікувалося, складову тестового сигналу, якій відповідає частота 0,05 Гц, не було виявлено, тоді як складову з частотою, близькою до 1,2 Гц, впевнено виявлено, хоча і з деякою похибкою за частотою, викликаною, насамперед, зміною частоти основної складової тестового сигналу (від 50 до 49 Гц). Звернімо увагу на те, що у четвертому вікні стеження (середині цього вікна відповідає восьма секунда) виявлено складову сигналу з частотою 1.053 Гц та амплітудою 0.081 в.о. (ці дані знаходяться у стовпцях “Сміття” табл. 1, їх виділено напівжирним шрифтом). Очевидно, зазначені дані “належать” складовій тестового сигналу, якій відповідає частота 1,2 Гц і яку не було виявлено у попередньому вікні стеження (його середині відповідає сьома секунда). Що ж стосується виявлення складової тестового сигналу, якій відповідає частота 0,09 Гц, то її присутність у тестовому сигналі виявлено лише у п’яти із 11 вікон стеження, що можна вважати непоганим результатом, якщо брати до уваги, що ширина вікна стеження становила 10 с.

У випадку, коли ширину вікна стеження було зменшено до 2 с, складову тестового сигналу, якій відповідає частота 1,2 Гц, теж було виявлено – у тринадцяти із 19 вікон стеження (рис. 3), хоча і з помітними похибками (визначені значення частоти знаходилися, переважно, на рівні 1,42 Гц). Порівняння графіка зміни амплітуди складової з частотою 1,2 Гц, наведеного на рис. 2 (штрих-пунктирна лінія), з відповідним графіком на рис. 3, вказує також на наявність локальних похибок і у визначенні амплітуди цієї складової (“провали” у значеннях амплітуди), хоча, не дивлячись на “провали”, загальна тенденція зростання амплітуди на 20-секундному інтервалі чітко простежується.

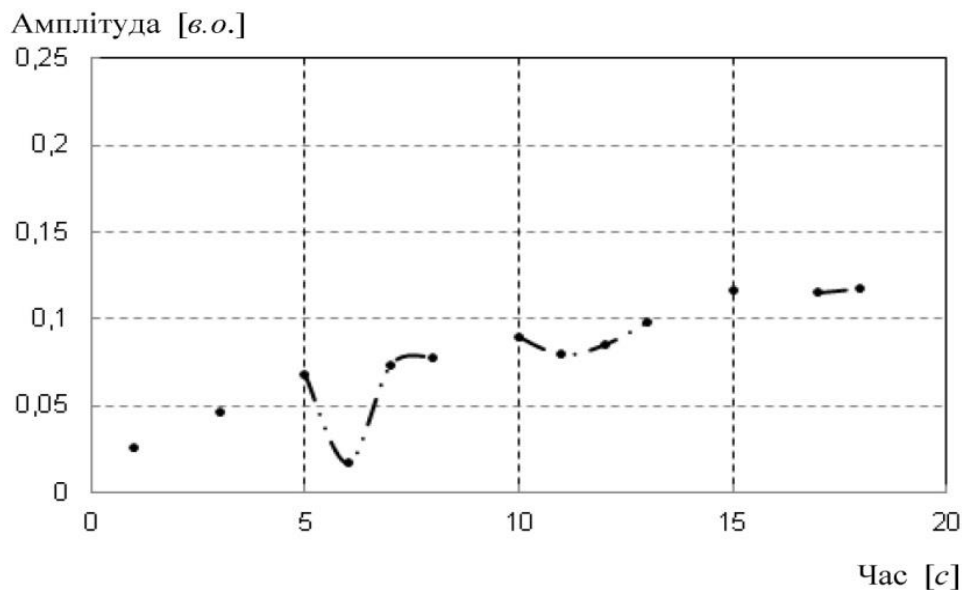


Рисунок 3 – Зміна амплітуди складової сигналу, якій відповідає частота 1,2 Гц

Проілюструємо вплив частоти дискретизації, яка використовується під час формування вибірки даних, та ширини вікна стеження на результати визначення параметрів складових сигналу у разі застосування МНКГ.

Аналіз тестового сигналу з використанням МНКГ

Наведемо результати аналізу синтезованого сигналу (2), що містить різні складові, зокрема і з характерним для ОЕС порядком електромеханічних частот. У виразі (2) знаки множення, взагалі-то, не показано, але “зірочку” (*) як знак множення все ж використано перед значенням частоти (f) кожної із складових

$$y = 100 \sin(2\pi * 50 t) + (1+t) \sin(2\pi * 0.10 t) + (1+1.5 t) \sin(2\pi * 0.15 t) + (1+1.3 t) \sin(2\pi * 1.5 t) + (1+1.1 t) \sin(2\pi * 1.9 t) + (1+t) \sin(2\pi * 10 t) + \text{БШ}. \quad (2)$$

Амплітуди складових сигналу зростають зі зміною часу (виняток становить складова з частотою 50 Гц, амплітуда коливань якої залишається незмінною).

Кожну (i -ту) складову сигналу можна охарактеризувати кількома параметрами: частотою $\omega_i = 2\pi f_i$ [рад./с] чи f_i [Гц]; фазою φ_i [рад. чи град.]; амплітудою A_i (у разі реальних сигналів – в іменованих чи відносних одиницях [в.о.]); сталою демпфування α_i [с⁻¹]; показником демпфування $\xi_i = -\alpha_i (\alpha_i^2 + \omega_i^2)^{-0.5}$ [в.о.].

Визначальними в аспекті оцінювання небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС, обумовленої виникненням НЧК, є значення частот домінантних мод (моди – складові вільних коливань ОЕС) та відповідних показників демпфування (домінантними називатимемо погано демпфовані низькочастотні моди). За значеннями та зміною у часі амплітуд домінантних мод теж можна робити висновки щодо зміни енергії відповідної складової коливань та існування небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС. Спеціально синтезовані сигнали дозволяють визначити умови “працездатності” окремих методів аналізу сигналів та можливість і доцільність їх використання у складі “інформаційного ядра” ІСД НЧК.

В табл. 2 наведено деякі результати ідентифікації та визначення параметрів складових сигналу за різної ширини вікон стеження, що “охоплювали” різні часові інтервали (наведено 5 випадків, що стосуються різної ширини вікна стеження – від 1 до 10 с), та частоти дискретизації (f_δ) сигналу під час формування вибірки даних (наведено результати для двох випадків: $f_\delta = 25$ Гц та $f_\delta = 50$ Гц). Одночасно з різною шириною вікон стеження під час досліджень використовувалися моделі сигналу різного порядку (5-го, 8-го, 13-го, 16-го).

Таблиця 2 – Визначені параметри виявлених складових сигналу (2) з використанням МНКГ

f_0 , $\Gamma\text{ц}$	Параметр складової сигналу	Ширина вікна стеження (“охоплований” часовий інтервал) [с] / порядок моделі сигналу				
		0–1 с / 5	0–2 с / 8	0–3 с / 8	0–5 с / 13	0–10 с / 16
25	f , $\Gamma\text{ц}$	0	0,139	0,141	0	0,079
		1,770	1,474	1,482	0,158	0,170
		10,00	1,927	1,914	1,486	1,493
			10,00	10,00	1,673	1,505
					1,912	1,895
					9,984	1,908
					10,00	9,999
	ξ , в.о.	-1	-0,481	-0,440	1	-0,031
		0	-0,057	-0,053	-0,139	-0,072
		-0,011	-0,046	-0,041	-0,027	0,003
			-0,008	-0,006	0,041	-0,004
					-0,022	-0,003
					0,007	0,003
					-0,003	0
50	f , $\Gamma\text{ц}$	0	0,163	0,140	0	0,066
		1,757	1,470	1,477	0,152	0,166
		10,01	1,936	1,925	1,488	1,489
			10,00	10,00	1,686	1,508
					1,911	1,899
					9,997	1,901
					10,00	9,997
	ξ , в.о.	-1	-0,540	-0,451	1	0,114
		0,005	-0,056	-0,057	-0,133	-0,056
		-0,012	-0,041	-0,044	-0,028	0,001
			-0,008	-0,006	0,058	-0,003
					-0,020	0,006
					0,006	-0,004
					-0,003	0
				0		

Наведені в табл. 2 результати свідчать, що у разі використання близького до адекватного (дещо завищеного) порядку моделі сигналу та ширині вікна стеження у 10 с правильно визначено (з певними похибками, але “впізнавані”) усі частоти складових сигналу (їх зазначено напівжирним шрифтом). У разі використання ширини вікна стеження у 2 с та заниженого порядку моделі правильно визначено (з певними похибками, але “впізнавані”) майже усі частоти складових сигналу (2): невизначеною залишилася складова з найнижчою частотою (0,1 $\Gamma\text{ц}$), амплітуда коливань якої зростала найповільніше. Є невірною визначені показники демпфування: за винятком складової з незмінною амплітудою коливань, показники демпфування інших складових сигналу повинні бути від’ємними. Зміна частоти дискретизації f_0 (з 25 на 50 $\Gamma\text{ц}$) не мала суттєвого впливу на результати ідентифікації та визначення частот та показників демпфування складових синтезованого сигналу (2). Результати виконаних досліджень [9] свідчать, що від вибору порядку моделі сигналу залежить, насамперед, тривалість аналізу та кількість складових, які може бути “виявлено”: заниження порядку може призводити до того, що складові з малими амплітудами і від’ємними коефіцієнтами демпфування будуть “приховані” складовими з більшими амплітудами і додатними коефіцієнтами демпфування, тобто їх не буде виявлено, у той час як надмірне завищення порядку моделі буде призводити до збільшення часу виконання обчислень та до “виявлення” хибних

складових сигналів з можливим одночасним викривленням значень параметрів дійсних (що містяться в сигналі) складових сигналів. Уникнути негативних наслідків суб'єктивного "призначення" порядку моделі дозволило використання методу *мінімальної описової довжини* [13].

Висновки

1. Ефективне вирішення проблеми демпфування НЧК та запобігання коливному порушенню стійкості ОЕС України можливо на базі створення ІСД НЧК, три складові якої функціонують у різних часових "шарах", у різному вимірі часу. Первинним джерелом інформації для ІСД НЧК є ЄВРП "Регіна-Ч".

2. Основою "інформаційного ядра" ІСД НЧК повинен бути ансамбль "індивідуально" налаштованих методів (відповідних програмних засобів) аналізу сигналів, що витримали всебічну перевірку з використанням спеціально синтезованих багатокомпонентних сигналів. Використання такого ансамблю дозволить надійніше ідентифікувати домінуючі моди НЧК та визначити їхні параметри, "колективно" відсіювати хибні складові, якщо такі "виявлятиме" якийсь із методів.

Список літератури

1. Yutaka Ota, Hiroyuki Ukai, Koichi Nakamura, Yasunori Mitani, Masahide Hojo, and Osamu Saeki "PMU based power oscillation detection system and its application to Japanese longitudinal power system", 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005, Session 4, Paper 6.
2. Kakimoto N., Sugumi M., Makino T., Tomiyama K. "Monitoring of interarea oscillation mode by synchronized phasor measurement", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 1, February 2006. – Pp. 260-268.
3. Messina A.R., Vittal V. "Nonlinear, non-stationary analysis of interarea oscillation via Hilbert spectral analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 3, August 2006. – Pp. 1234-1241.
4. Far H.G., Banakar H., Li P., Luo C., Ooi B.-T. "Damping Interarea Oscillations by Multiple Modal Selectivity Method", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 2, May 2009. – Pp. 766-775.
5. Arango O.J., Sanchez H.M., Wilson D. H. "Low Frequency Oscillations in the Colombian Power System Identification and Remedial Actions", 2010 CIGRE Session, Paper C2-105.
6. Jakpattanajit C., Hoonchareon N., Yokoyama A. "On-line Estimation of Power System Low Frequency Oscillatory Modes in Large Power Systems", Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 1, No. 3, 2011. – Pp. 352-358.
7. Агамалов О.Н., Буткевич А.Ф. Вопросы построения интегрированной системы управления возбуждением синхронных машин в объединенной энергосистеме // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 57-61.
8. Butkevych O., Agamalov O. Power System Stability and Robustness of Synchronous Machine's Excitation Control with Magnitude-Phase Voltage Regulator // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 41-43.
9. Буткевич О.Ф., Чижевський В.В. Оцінювання та зменшення в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості об'єднаної енергосистеми // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 46-52.
10. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.L., Shih H.H., Zheng Q., Tung N.C.Y.C C., and Liu H.H., "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis," Proc. R. Soc. London, 1998, Vol. 454. – Pp. 903–995.
11. Huang N.E., Wu M.L.C., Long S.R., Shen S.S.P., Qu W., Gloersen P., Fan K. L. "A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis", Proc. R. Soc. London, 2003, Vol. 459. – Pp. 2317-2345.
12. Laila D.S., Messina A.R., Bikash C. P. "A Refined Hilbert–Huang Transform With Applications to Interarea Oscillation Monitoring", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 2, May 2009. – Pp. 610-620.
13. Lin T.-H., Soo V.-W. "Pruning Fuzzy ARTMAP Using the Minimum Description Length Principle in Learning from Clinical Databases", Ninth IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Proceedings. – 1997, November 3-8, Newport Beach, California. – Pp. 396–403.

O. Butkevych, V. Chyzhevskiy

¹ – **The Institute of Electrodynamics**

² – **National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"**

SOME PROBLEMS OF INTEGRATED SYSTEM CONSTRUCTION FOR PREVENTION OF INTERCONNECTED POWER SYSTEM'S OSCILLATORY INSTABILITY

Some features construction of an integrated damping system (IDS) of electromechanical low-frequency oscillations (LFO) in the Integrated Power System (IPS) of Ukraine are presented. Computer software of identifying the dominant modes of LFO is the source of information for IDS LFO. Such means in real-time evaluate a current risk of oscillatory loss of IPS stability. Primary sources of information for IDS LFO are the phasor measurement units. It is shown that the selection of signal analysis methods suitable for use in the IDS LFO is based on the comprehensive testing of these methods.

Key words: Interconnected power system, electromechanical low-frequency oscillations, damping, phasor measurement unit, signal analysis methods

References

1. Yutaka Ota, Hiroyuki Ukai, Koichi Nakamura, Yasunori Mitani, Masahide Hojo, and Osamu Saeki "PMU based power oscillation detection system and its application to Japanese longitudinal power system", 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005, Session 4, Paper 6.
2. Kakimoto N., Sugumi M., Makino T., Tomiyama K. "Monitoring of interarea oscillation mode by synchronized phasor measurement", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 1, February 2006. – Pp. 260-268.
3. Messina A.R., Vittal V. "Nonlinear, non-stationary analysis of interarea oscillation via Hilbert spectral analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 3, August 2006. – Pp. 1234-1241.
4. Far H.G., Banakar H., Li P., Luo C., Ooi B.-T. "Damping Interarea Oscillations by Multiple Modal Selectivity Method", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 2, May 2009. – Pp. 766-775.
5. Arango O.J., Sanchez H.M., Wilson D. H. "Low Frequency Oscillations in the Colombian Power System Identification and Remedial Actions", 2010 CIGRE Session, Paper C2-105.
6. Jakpattanajit C., Hoonchareon N., Yokoyama A. "On-line Estimation of Power System Low Frequency Oscillatory Modes in Large Power Systems", Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 1, No. 3, 2011. – Pp. 352-358.
7. Agamalov O.M., Butkevych O.F. "The questions of an integrated excitation control system of synchronous machines construction in the interconnected power system", Tekhnichna elektrodynamika, 2015, No. 4. – Pp. 57-61.
8. Butkevych O., Agamalov O. "Power System Stability and Robustness of Synchronous Machine's Excitation Control with Magnitude-Phase Voltage Regulator", Tekhnichna elektrodynamika, 2014, No. 5. – Pp. 41-43.
9. Butkevych O.F., Chyzhevskiy V.V. "Evaluation and decrease in real time of risk of oscillatory loss of Inter connected Power System stability", Tekhnichna elektrodynamika, 2015, No. 6. – Pp. 46-52.
10. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.L., Shih H.H., Zheng Q., Tung N.C.Y.C C., and Liu H.H., "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis," Proc. R. Soc. London, 1998, Vol. 454. – Pp. 903–995.
11. Huang N.E., Wu M.L.C., Long S.R., Shen S.S.P., Qu W., Gloersen P., Fan K. L. "A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis", Proc. R. Soc. London, 2003, Vol. 459. – Pp. 2317-2345.
12. Laila D.S., Messina A.R., Bikash C. P. "A Refined Hilbert–Huang Transform With Applications to Interarea Oscillation Monitoring", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 2, May 2009. – Pp. 610-620.
13. Lin T.-H., Soo V.-W. "Pruning Fuzzy ARTMAP Using the Minimum Description Length Principle in Learning from Clinical Databases", Ninth IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Proceedings. – 1997, November 3-8, Newport Beach, California. – Pp. 396–403.

УДК 621.311

А.Ф. Буткевич¹, докт. техн. наук, В.В. Чижевский²
¹ - Институт электродинамики НАН Украины

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ НАРУШЕНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Изложены некоторые особенности построения интегрированной системы демпфирования (ИСД) электромеханических низкочастотных колебаний (НЧК) в Объединенной энергосистеме (ОЭС) Украины. Источником информации для ИСД НЧК являются программные средства идентификации доминирующих мод НЧК. Такие средства в режиме реального времени оценивают опасность колебательного нарушения устойчивости ОЭС. Первичным источником информации для ИСД НЧК являются устройства векторных измерений. Показано, что селекция методов анализа сигналов, пригодных для использования в ИСД НЧК, базируется на всестороннем тестировании этих методов.

Ключевые слова: объединенная энергосистема, электромеханические низкочастотные колебания, демпфирование, устройство векторных измерений, методы анализа сигналов

Надійшла 29.10.2015
Received 29.10.2015

В.А. Єрошенко, д-р техн. наук, професор, А.В. Тишковець, магістр, В.О. Бублей, магістр
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЦИКЛУ ЄРОШЕНКА ЯК АЛЬТЕРНАТИВИ ЦИКЛУ РЕНКІНА В ЕНЕРГЕТИЦІ

В статті представлений порівняльний аналіз циклу Ренкіна з циклом Єрошенка на основі конденсованих гетерогенних ліофобних систем.

Суттєвою перевагою циклу Єрошенка є компактні розміри теплосилової установки без фазового переходу «вода-пара», що дозволяє використовувати дані установки в місцях з обмеженим простором (транспортні засоби, космічні апарати, підводні човни тощо), а також як маневрені блоки різної потужності для покриття пікових навантажень. Крім того, привабливою є і екологічна складова, оскільки установки безшумні, зменшують теплове забруднення навколишнього середовища, а на своє виробництво потребують значно менших витрат конструкційних матеріалів.

Зважаючи на потенціал циклу Єрошенка та його технічні можливості, цикл можна вважати перспективним для вирішення енергетичних проблем, у тому числі – для виходу України з енергетичної кризи.

Ключові слова: термомолекулярна енергетика, гетерогенна ліофобна система, міжфазна поверхня, інтрузія, екструзія, термодинамічна компактність, рекуперация тепла, екологія.

Вступ

Розвиток енергетики в ХХ-ХХІ ст., без сумніву, пов'язаний з успіхом технічної термодинаміки, бо вона є основною ланкою для пошуку, відкриття та дослідження нових напрямків в енергетиці.

Незважаючи на різноманітність прямих термодинамічних циклів, фізико-енергетична сутність перетворення теплової енергії в механічну протягом останніх двох століть не змінювалась [1,2]: кінетичну енергію хаотичного теплового руху молекул газу чи пари перетворювали в організовану форму механічної енергії і далі, за потреби, перетворювали в електричну. При цьому потенційною енергією міжмолекулярної взаємодії нехтували в силу її малих значень для реальних газів.

У новому напрямі енергетики, який отримав назву «Термомолекулярна енергетика (ТМЕ)» [3-5], ставка робиться на потенційну енергію міжмолекулярної взаємодії в термомеханічних системах та особливість явищ утворення міжфазної поверхні «рідина-тверде тіло» як носія вільної поверхневої енергії, яка може виконувати механічну роботу.

Отже, базовим принципом в новому напрямку є використання потенційної енергії міжмолекулярної взаємодії в гетерогенних ліофобних системах (ГЛС) [6-8] «рідина – капілярно-пориста матриця, не змочена цією рідиною» не тільки для перетворення теплової енергії в механічну (і навпаки), а також для вирішення інших важливих інженерних задач технічної термодинаміки (акумуляція і дисипація енергії).

Постановка задачі

Принципово новий напрям в технічній термодинаміці – ТМЕ – вже набув визнання в наукових і промислових колах розвинених країнах світу (США, Японія, Франція, Росія, Китай, Південна Корея та інші). Детальний аналіз справ в термомолекулярній енергетиці можна знайти в [9,10]. Нове робоче тіло - гетерогенна ліофобна система - знайшло застосування в амортизаторах [11-17] та демпферуючих системах [18], акумуляторах [19-22] і в розробках нового класу теплових двигунів та термомеханічних пристроях [23-30]. Більше того, ГЛС завдяки швидкому розвитку науки і техніки все ширше проникає у нові галузі промисловості, а його нові компоненти «рідина плюс капілярно-пориста матриця», що з'являється з часом, дозволятимуть ще більш ефективно вирішувати багато важливих інженерно-технічних проблем. Проте, одне з ключових питань поки залишається без відповіді... Чи зможе гетерогенна ліофобна система замінити традиційне робоче тіло «пара-конденсат» в циклі Ренкіна, і якщо так, то які перспективи це відкриває перед інженерами-енергетиками? Звернення до циклу Ренкіна пов'язано з тим, що основою сучасної енергетики [31-32] є традиційні паросилові установки, які реалізують цикл Ренкіна (АЕС) або цикл Ренкіна – Хірна (з перегрівом пари на ТЕС). Беручи до уваги новий термодинамічний цикл Єрошенка [23-27] з використанням міжфазної поверхні Ω замість води/пари, спробуємо порівняти його з циклом Ренкіна.

Уявлення про ГЛС

Гетерогенна ліофобна система (ГЛС) – це конденсована, хімічно нейтральна система «рідина - капілярно-пориста матриця, що не змочується цією рідиною» з міжфазною поверхнею Ω , яка є

екстенсивним параметром системи. Інтенсивним параметром цієї системи виступає поверхневий натяг рідини σ на межі з твердим тілом. Унікальність і принципова новизна термомолекулярної енергетики (ТМЕ) [3-6] полягає в тому, що замість кінетичної енергії газу і пари (для яких екстенсивним параметром є об'єм V , а інтенсивним – тиск P) в ТМЕ вперше було запропоновано використовувати потенційну енергію міжмолекулярної взаємодії на міжфазних поверхнях Ω для акумулювання, дисипації і перетворення теплової та механічної енергій в реальних термомеханічних системах.

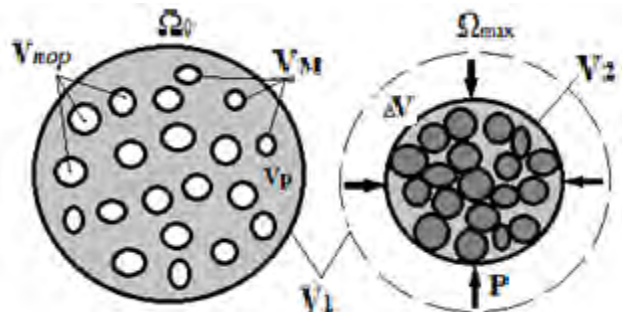


Рисунок 1 – Гетерогенна ліофобна система [6-8]

На рис.1 представлено фрагмент ГЛС: суспензія “рідина – дискретні пористі частинки”, де тиск P в будь-якій точці гетерогенної системи визначається капілярним тиском Лапласа P_L [3-4], який на декілька порядків вище можливого гідростатичного тиску в робочих камерах термомеханічних пристроїв:

$$P_L = \frac{\sigma \cdot \cos \theta}{kr}, \text{ бар} \quad (1)$$

де; σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, н/м або Дж/м²; θ - контактний кут в системі “рідина (кластер) на твердій поверхні”, k – коефіцієнт форми пор капілярів з характерним радіусом r ($0,33 \leq k \leq 0,50$; $k=0.3$ – для сфер, $k=0.5$ - для каналів/капілярів). Тут і далі, для спрощення запису рівнянь, беремо до уваги модуль $\cos \theta$, бо тиск в системі завжди позитивний, а для кутів $\theta \gg 90^\circ$ (ліофобні системи) $\cos \theta$ є від’ємним.

При зовнішньому тиску $P \geq P_L$ відбувається *інтрузія* рідини в поровий простір матриці, при $P \leq P_L$ здійснюється самовільна *екструзія* кластерів рідини з пор (малюнки 1 і 2).

Робочий тиск в ГЛС вибирається із умови: $P_L > P_{\text{нас}}$ (тиск насиченого пару), щоб запобігти утворення парової фази в поровому просторі матриці (дивись далі).

На рис. 2 зображена фізична модель ГЛС, яка складається з капілярно-пористої матриці 1 (об’єм $V_m = \text{const}$ з об’ємом порового простору $V_{\text{пор}} = \text{const}$) і рідини 2 (об’єм $V_p = \text{const}$), що не змочує цю матрицю. Гіпотетичний поршень 3 здійснює переміщення в циліндрі 4.

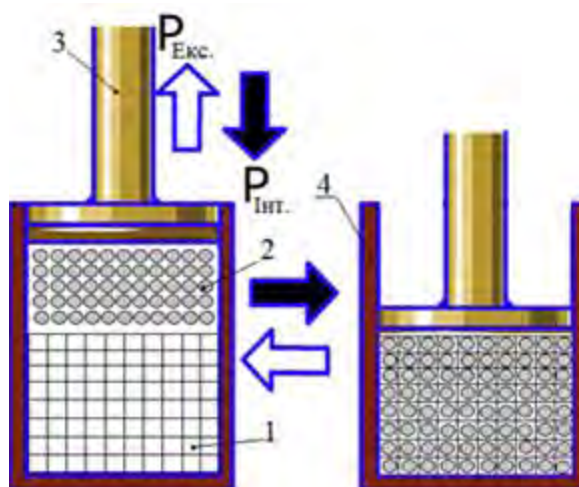


Рисунок 2 – Фізична модель гетерогенної ліофобної системи

Завдяки незмочуваності матриці 1 рідина 2 не може самовільно увійти в поровий простір матриці. Примусове стискання ГЛС ($dV < 0$, $d\Omega > 0$) та її самовільне розширення ($dV > 0$, $d\Omega < 0$) здійснюються завдяки інтрузії-екструзії рідини в поровий простір матриці з об'ємом пор $V_{\text{пор}} = k\tau\Omega$ (k – згаданий коефіцієнт форми пор/капілярів) і дії молекулярних сил відштовхування на міжфазній поверхні Ω . В процесах стискання-розширення ГЛС відбувається, відповідно, розвиток ($d\Omega > 0$) та зменшення ($d\Omega < 0$) міжфазної поверхні, що і визначає зміну об'єму всієї гетерогенної системи $V = V_m + V_p - k\tau\Omega$

$$dV = -k\tau d\Omega \cdot \text{м}^3, \quad (2)$$

Отож ми маємо певного роду парадокс: два конденсованих тіла, що не піддаються стисненню/деформації, зменшують загальний об'єм гетерогенної системи під дією зовнішніх сил і повертаються в початкове положення, коли дія зовнішніх сил зникає. Своєю поведінкою ГЛС частково нагадує відомі в хімії «сполучення включень» – клатрати АВ [33]: мала молекула А (у нашому випадку – рідина) входить у внутрішній простір великої молекули В (матриця), зменшуючи загальний об'єм клатрата АВ, і залишається там назавжди завдяки стерічному ефекту. На відміну від традиційних клатратів АВ, рідина А в ГЛС примусово входить в поровий простір матриці В (об'єм клатрата зменшується), але може самовільно покинути його під дією відштовхуючих (репульсивних) сил (об'єм клатрата збільшується). Ця особливість ГЛС дозволила класифікувати її як «*репульсивні клатрати*» (РК) – молекулярні пружини [34-36].

Як матриці для ГЛС застосовуються цеоліти, силікагелі, силохроми, Al_2O_3 , пористі стекла, тощо [7.8]. Як рідина: вода і водні розчини, розчини солей, евтекти та низькотемпературні сплави, тощо [7.8].

Уявлення про новий термодинамічний цикл

Цикл на основі ГЛС/РК є принципово новим: складається із двох ізобар-ізотерм і двох ізоп (ізоена-від латинського *epi* – поверхня) [23-25]. Робочим тілом в термодинамічному сенсі виступає міжфазна поверхня Ω , а в технологічному - ансамбль «рідина і капілярно-пориста матриця», дві нестискувані речовини. Застосовуємо уніпористу матрицю ($\tau = \text{const}$).

В ізоперфузному процесі (процес «1-2» майже ізохорний, див. мал.3б) до гетерогенної системи підводять тепло q_{1-2} для нагріву її від температури T_2 до температури T_1 (при цьому площа Ω міжфазної поверхні «рідина – матриця» має мінімальне значення Ω_{min} , навіть може бути близькою до нуля).

$$\delta q_{1-2} = C_{\Sigma}(T_1 - T_2), \text{ Дж} \quad (3)$$

де $C_{\Sigma} = \sum_1 V_i \cdot c_i$ – сумарна теплоємність об'ємної фази системи (рідина і матриці), Дж/К, де V_i – об'єми компонентів системи, м^3 ; c_i – *питомі теплоємності компонентів системи*, Дж/ $\text{м}^3 \cdot \text{К}$; T_1 - температура джерела тепла, К; T_2 - температура холодильника, К. Тут і далі нехуємо температурною і механічною деформаціями δV_i кожної з компонент ГЛС ($\delta V_{\text{тем}} = 0, \delta V_{\text{мех}} = 0$).

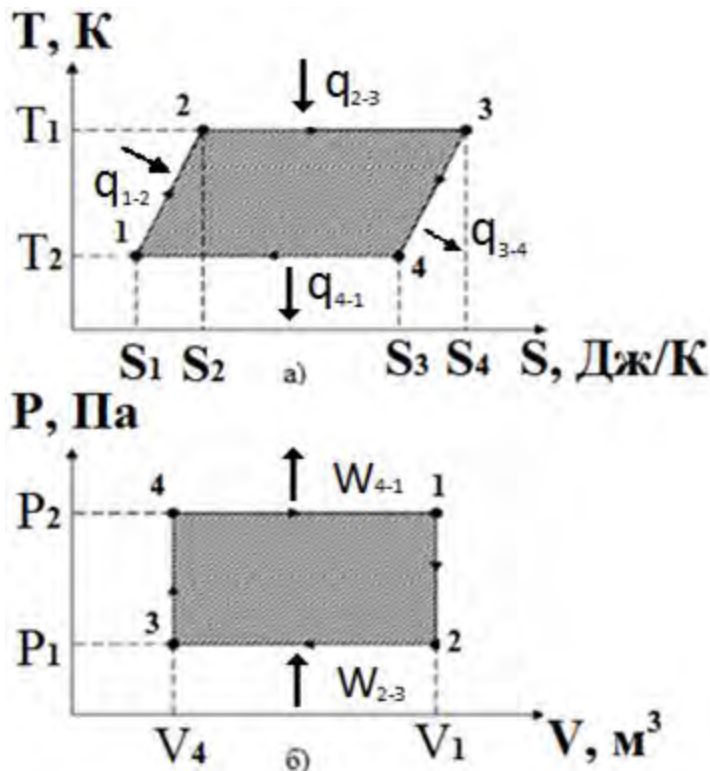


Рисунок 3 – T-S та P-V-діаграми термодинамічного циклу Єрошенка [23-25]

Нагадаємо, що тиск в системі підкоряється гідравлічному закону Паскаля і в розглянутому випадку визначається капілярним тиском Лапласа P_L . [3-4]. В процесі нагрівання “1-2” (див. рис.3,б) тиск P в системі знижується від значення P_2 до значення P_1 , бо в замкнутому об’ємі $V_1 = const$ поверхневий натяг рідини σ (при її незмінному хімічному складі) знижується з ростом температури і разом з ним знижується тиск $P_1(1)$. [37]

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_{кр}}\right), \quad (4)$$

де σ_0 – гіпотетичне значення σ при $T = 0^\circ\text{C}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$, $T_{кр}$ – критична температура робочої рідини, К.

В ізобарно-ізотермічному процесі “2-3” утворення міжфазної поверхні Ω ($\Delta\Omega > 0$) до системи підводяться в великій кількості теплота δq_{2-3} і невелика робота δW_{2-3} , бо стиск гетерогенної системи від об’єму V_1 до об’єму V_4 відбувається при низькому тиску P_1 . При цьому маємо $\Delta V = V_1 - V_4 = V_{пор}$ та $\delta q_{2-3} > 0$ і $\delta W_{2-3} > 0$.

Теплота δq_{2-3} ізотермічного ($T_1 = const$) утворення поверхні ($\Delta\Omega > 0$, $\Delta V < 0$) в процесі 2-3:

$$\delta q_{2-3} = T_1 \cdot \frac{d\sigma}{dT} \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega, \text{ Дж} \quad (5)$$

де $\frac{d\sigma}{dT}$ – температурний коефіцієнт поверхневого натягу рідини, $\frac{d\sigma}{dT} < 0$, $\frac{\text{Н}}{\text{м}\cdot\text{К}}$. Далі використовуємо модуль цього коефіцієнту.

Робота δW_{2-3} в тому ж ізобарно-ізотермічному процесі 2-3 ($T_1 = const, P_1 = const$):

$$\delta W_{2-3} = -P_1 \cdot \Delta V = P_1 \cdot k \cdot r \cdot \Delta\Omega = \sigma_1 \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega, \text{ Дж} \quad (6)$$

В ізоповірневному процесі “3-4” ($\Omega_{max} = const$, ізоепа) від гетерогенної системи відводиться тепло $\delta q_{3-4} = -\delta q_{1-2}$ зі зниженням температури від T_1 до T_2 (див. рис.3а). При цьому в замкнутому об’ємі ($V_4 = min = const$ при $\Omega = \Omega_{max}$) через зниження температури тиск в системі збільшується до величини P_2 . (мал. 3б).

В ізобарно-ізотермічному процесі “4-1” (робочий такт) самовільне зменшення міжфазної поверхні ($\Delta\Omega < 0$) від значення Ω_{max} до значення $\Omega_{min} \approx 0$) відбувається завдяки самовільному виштовхуванню кластерів рідини із пор капілярно-пористої матриці з об’ємом $\Delta V = V_{пор} > 0$ при максимальному тиску P_2 .

В процесі «4-1» ($P_2 = const, T_2 = const$) виділяється в зовнішнє середовище теплота δq_{4-1} , менша за δq_{2-3} , в результаті самовільного зменшення міжфазної поверхні ($\Delta\Omega < 0$):

$$\delta q_{4-1} = T_2 \cdot \frac{d\sigma}{dT} \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega, \text{ Дж} \quad (7)$$

При цьому система в ізобарно-ізотермічному процесі ($P_2 = const, T_2 = const$) здійснює велику роботу δW_{4-1} над зовнішнім середовищем (проти зовнішніх сил): $\delta W_{4-1} < 0$ через $\Delta\Omega < 0$ і $\Delta V > 0$.

$$\delta W_{4-1} = -P_2 \cdot \Delta V = \sigma_2 \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega, \quad \text{Дж} \quad (8)$$

Корисна робота в циклі з урахуванням (6) та (8) визначається за формулою:

$$W_\Omega = \delta W_{2-3} - \delta W_{4-1} = -(\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega < 0, \text{ Дж} \quad (9)$$

Одним з корисних критеріїв термодинамічної досконалості циклів і теплових машин являється їх термодинамічна компактність (ТК) [1,2].

Термодинамічна компактність l нового циклу дорівнює [9.10]:

$$l = \frac{\delta W_\Omega}{\Delta V \cdot \Delta T} = \frac{\cos\theta}{k \cdot r} \cdot \frac{d\sigma}{dT}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \quad (10)$$

Враховуючи розмірність $l = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}\right]$, можна стверджувати, що вона характеризує величину максимальної корисної роботи δW в термодинамічному циклі, яку можна отримати на одиницю об’єму V робочої камери (бо $\Delta V = V_1 - V_4 \approx V$ в традиційних теплових двигунах внутрішнього згорання) на один Кельвін всього діапазону зміни температур в циклі ($\Delta T = T_1 - T_2$). В новому циклі зміна об’єму дорівнює величині $\Delta V = V_{пор}$.

Нагадування про цикл Ренкіна

Лінія А-К-В в Т-S діаграмі вода-пара (рис. 4) є поділяючою, вище цієї лінії зліва існує тільки рідина, а справа - тільки пар, нижче - паро-водяна суміш. Тут і далі розглядається спрощений цикл Ренкіна.

Вологий пар в конденсаторі повністю перетворюється в рідину по ізобарі $P_2 = const$ (лінія 2 - 3, мал. 4 а). Потім вода стискається насосом від тиску P_2 до тиску P_1 ; цей адиабатний процес зображений в TS-діаграмі вертикальним відрізком 3-5 (рис. 4 б).

Довжина відрізка 3-5 в TS-діаграмі дуже мала, так як ізобари в точках 3 і 5 PV-діаграми для рідини в TS-діаграмі проходять дуже близько одна від одної. Завдяки цьому при ізоентропійному стисненні води її температура зростає менш, ніж на 2 - 3 °С, і можна з високим ступенем наближення вважати, що в цій області ізобари води P_1 і P_2 практично збігаються з лівою пограничною кривою АК. Тому часто при зображенні циклу Ренкіна в TS-діаграмі ізобари P_1 і P_2 зливаються в одну і, зазвичай, її позначають просто P_1 . Мала величина відрізка адиабати 3-5 на T-S діаграмі і відсутність нахилу вліво відрізка 3-5 на P-V діаграмі свідчить про малу роботу, затрачену насосом на стиск води. Мала величина роботи стиснення в порівнянні з великою роботою, виробленою водяною парою в процесі розширення 1-2, є суттєвою перевагою циклу Ренкіна.

З насоса вода під тиском P_1 надходить в котел, де до неї ізобарно (в процесі 5-4 тиск $P_1 = \text{const}$) підводиться тепло. Спочатку вода в котлі нагрівається до кипіння (ділянка 5-4 ізобари $P_1 = \text{const}$), а потім, після досягнення температури кипіння, відбувається процес пароутворення (ділянка 4-1 ізобари $P_1 = \text{const}$). Пароводяна суміш надходить в барабан-сепаратор, де відбувається поділ води і пари. Насичений пар з барабана-сепаратора надходить в турбіну, а якщо відбувається цикл з перегрівом пари, то між барабаном і турбіною водяна пара проходить ще й пароперегрівач. Процес розширення в турбіні зображується адиабатою 1-2. Цей процес відноситься до класичного циклу Ренкіна, в реальній установці процес розширення пари в турбіні дещо відрізняється від класичного, бо в більшості сучасних силових установок, що реалізують цикл Ренкіна, присутній проміжний перегрів. навіть на атомних станціях, що працюють на вологій парі. Майже всі станції працюють з відборами пари (тепловими чи регенеративними), які призначені для підвищення ефективності станції в цілому. Після турбіни відпрацьований вологий пар надходить в конденсатор, звідки конденсаційним насосом подається в живильний насос і цикл замикається (процес 2-3 на рис.4).

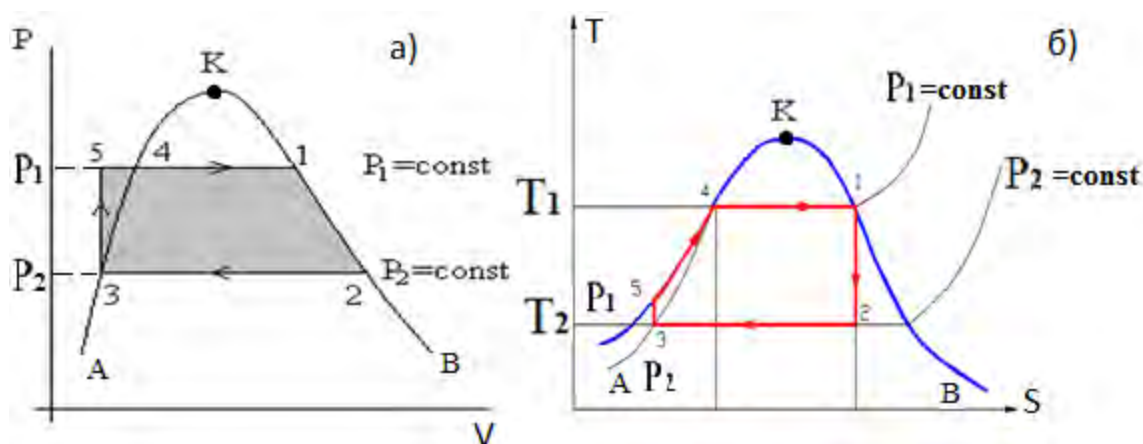


Рисунок 4 – Цикл Ренкіна в PV та TS – координатах [31,32]

Порівняння циклів

Цикл Ренкіна, перевірений часом і максимально допрацьований в сучасній енергетиці, давно вже став традиційним. Застосування циклу Єрошенка в енергетиці на даний час немає. Який же цикл може бути ефективнішим з точки зору термодинаміки?..

Для порівняння було вибрано цикл Ренкіна без перегріву пари, а за реальний прототип – енергоблок АЕС, що використовує реактор ВВЕР-1000. Цикл рахувався без відборів пари, а ентальпії в контрольних точках були взяті з довідника [38]. Як початкове робоче тіло буде використано воду. Діапазон тисків в циклі Ренкіна: $P_1=6,4\text{МПа}$, $P_2=0,0053\text{ МПа}$, $\Delta P=6,39\text{ МПа}$.; діапазон температур: $T_1=553\text{ К}$, $T_2=303\text{ К}$, $\Delta T = 305\text{ К}$. Розрахунок показує, що корисна робота в циклі Ренкіна W_R для 1 кг води в цих умовах дорівнює величині $W_R=0,668\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

A priori можна стверджувати, що обґрунтованість порівняння ГЛС-циклу з циклом Ренкіна буде тим переконливіше, чим менший радіус пор буде застосовуватись у матрицях. Це пов'язано з припущенням, що процес випаровування рідини в циклі Ренкіна відбувається з появою в паровій фазі практично окремих молекул води, що відірвалися від масивної фази.

Капілярно-пористі матриці в ГЛС грають роль «ножів-пристроїв», котрі механічним шляхом примусово розривають масивну фазу на окремі кластери (десятки чи сотні молекул в кожному) і в граничному випадку можуть розірвати її на окремі молекули (як в циклі Ренкіна для сухої пари), якщо використовувати матрицю з каналами (порами), діаметр яких співмірний з розміром молекули води

(~ 3 Ангстрема, Å). Уточнюємо, що розрив міжмолекулярних зв'язків в рідині за допомогою матриці не призводить до пароутворення: ГЛС залишається конденсованою системою.

Щоб довести апріорну доцільність використання матриць лише з малими порами, разом з матрицями з діаметром каналів, співмірним з розмірами молекул води ($r = 1.5 \div 12 \text{ Å}$), розглядаються матриці з розмірами пор-капілярів $12 \div 139 \text{ Å}$. Останні (з розміром 139 Å) розривають масивну фазу води на окремі кластери, а не молекули, що звідома зменшує міжфазну поверхню «рідина-матриця» і поверхневу енергію ГЛС. Це робить енергетичні показники (W_{Ω}) ГЛС – циклу (з радіусом пор матриці $r=139 \text{ Å}$) апріорно нижче, ніж енергоперетворюючі можливості циклу Ренкіна (W_R).

Для порівняння двох циклів розглянемо випадок, де розрахуємо їх питомі показники при рівних корисних роботах (використовуємо 1 кг води для цикла Ренкіна і знаходимо необхідну кількість води в ГЛС-циклі, яка забезпечить згадану роботу $W_{\Omega} = W_R = 0,668 \text{ МДж}$).

Із умови подавлення пароутворення в порах матриці (в робочій камері): " $P_L \geq P_{\text{нас.пара}}(T_1)$ " вибираємо радіус капіляра $r = 3\text{Å}$ (дивись формулу (1)), що гарантує конденсований стан води в поровому просторі матриці ГЛС.

Із умови виконання такої ж корисної роботи в новому циклі $W_{\Omega} = W_{Er}$, як в циклі Ренкіна W_R

$$W_{Er} = W_{\Omega} = (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \cos \theta \cdot \Delta\Omega = W_R = 0,668 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

(σ_1 і σ_2 – коефіцієнти поверхневого натягу рідини при температурах T_1 і T_2 , Н/м), розрахуємо величину $\Delta\Omega$:

$$\Delta\Omega = \frac{W_R}{(\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \cos \theta} \quad (11)$$

$$\Delta\Omega = \frac{0,668 \cdot 10^6}{(0,0691 - 0,0189) \cdot 1} = 13,3 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \quad (11a)$$

Як було сказано вище, застосування на практиці матриць з великим радіусом пор (порядку 139 Å) є недоцільним. Більш привабливі результати дало застосування матриць з діаметром пор в діапазоні $1,5 \div 12 \text{ Å}$. Як видно з формули (2), чим менший радіус пор капілярів має матриця з фіксованою пористістю, тим більшу міжфазну поверхню можна створити в одиниці її об'єму.

Повний об'єм порового простору $V_{\text{пор}}$ і максимальний об'єм води $V_{H_2O} = V_p = V_{\text{пор}}$, який потрібен для отримання даної міжфазної поверхні, визначаємо із рівняння (2)

$$\Delta V = kr\Delta\Omega = V_{\text{пор}} = 0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-10} \cdot 13,3 \cdot 10^6 = 0,002 \text{ м}^3, \quad (2a)$$

Із умови пористості матриці $\varphi = \frac{V_{\text{пор}}}{V_M} = 0,7$ визначимо потрібний об'єм матриці:

$$V_M = \frac{V_{\text{пор}}}{\varphi} = \frac{0,002}{0,7} = 0,00285 \text{ м}^3 \quad (12)$$

Загальний початковий об'єм ГЛС «матриця+рідина» V_0 (поровий простір не заповнений рідиною, $\Omega = 0$)

$$V_0 \approx V_M + V_p, \quad (13)$$

де $V_p = V_{H_2O} = V_{\text{пор}}$,

$$\text{буде} \quad V_0 \approx 0,00285 + 0,002 = 0,00485, \text{ м}^3 \quad (13a)$$

Після цього визначаємо кількість теплоти, задіяної в циклі Єрошенка.

Тепло q_{1-2} , підведене в процесі 1-2 для нагріву гетерогенної термодинамічної системи від температури T_2 до температури T_1 , визначається за формулою (3).

Як пориста матриця був вибраний уніпористий силікагель (хімічна формула SiO_2). Питома теплоємність та густина кристалічної фази діоксиду кремнію дорівнює відповідно $c_{\text{SiO}_2} = 0,728 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг}\cdot\text{К})}$, $\rho_{\text{SiO}_2} = 2648 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ [39]. Ці ж показники для води: $c_{H_2O} = 4,183 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг}\cdot\text{К})}$, $\rho_{H_2O} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Структура формул (13 і 13a) показує, що об'ємна частка води в ГЛС рівна 0,41, а кристалічна маса пористої матриці займає об'єм 0,59. Тоді сумарна питома (об'ємна) теплоємність системи визначається:

$$c_{\Sigma} = 0,41 \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_v^{H_2O} + 0,59 \cdot (1 - \varphi) \cdot \rho^{SiO_2} \cdot c_v^{SiO_2} \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}, \quad (14)$$

$$c_{\Sigma} = 0,41 \cdot 1000 \cdot 4,183 + 0,59 \cdot (1 - 0,7) \cdot 2648 \cdot 0,728 = 2056 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \quad (14a)$$

Нагадаємо, що подальший розрахунок проводиться для порівняння ключових параметрів двох циклів за умови виконання рівних корисних робіт: $W_R = W_{Er}$.

З врахуванням (3) визначимо δq_{1-2} для ГЛС з об'ємом $V_0 = 0.00485, \text{ м}^3$, де C_{Σ} – теплоємність з вказаним вище об'ємом системи

$$C_{\Sigma} = c_{\Sigma} \cdot V_0 \quad (15)$$

$$C_{\Sigma} = 2056 \cdot 0.00485 = 9,972 \frac{\text{кДж}}{\text{К}} \quad (15 \text{ а})$$

$$\delta q_{1-2} = 9,972 \cdot (553 - 303) = 2,49 \text{ МДж} \quad (3 \text{ а})$$

Тепло, підведене в циклі 2-3, визначається за формулою (5), де модульну величину $\cos\theta$ для малих радіусів приймаємо близькою до 1 (через малу кількість молекул в кластері рідини), а температурний коефіцієнт поверхневого натягу $\frac{d\sigma}{dT} = 0,17 \cdot 10^{-3}, \frac{\text{Н}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ [39]

$$\delta q_{2-3} = T_1 \cdot \frac{d\sigma}{dT} \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega,$$

$$\delta q_{2-3} = 553 \cdot 0,17 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 13,3 \cdot 10^6 = 1,25 \text{ МДж}. \quad (4 \text{ а})$$

Тепло в процесі “3-4” $\delta q_{3-4} = -\delta q_{1-2}$ (див. мал.3а) відводиться від гетерогенної системи зі зниженням температури від T_1 до T_2 .

$$\delta q_{3-4} = -C_{\Sigma}(T_1 - T_2) = -2,49 \text{ МДж}. \quad (3 \text{ б})$$

Кількість теплоти, відведеної від системи в процесі “4-1” (робочому такті), визначається за формулою (7)

$$\delta q_{4-1} = T_2 \cdot \frac{d\sigma}{dT} \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega,$$

$$\delta q_{4-1} = 303 \cdot 0,17 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 13,3 \cdot 10^6 = 0,685 \text{ МДж}. \quad (7 \text{ а})$$

Термічний ККД циклу Єрошенка для вибраної ГЛС буде рівним (без рекуперації тепла):

$$\eta_{Er} = \frac{\delta W_{4-1} - \delta W_{2-3}}{\delta q_{1-2} + \delta q_{2-3}} \cdot 100\% = \frac{0,668}{2,49 + 1,25} \cdot 100 = 17,9\%. \quad (16)$$

Величина термодинамічної компактності, розрахована для нового циклу за формулою (10), буде рівна:

$$l = \frac{1}{0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-10}} \cdot 0,17 \cdot 10^{-3} = 1,133 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}. \quad (10)$$

Так як величина η_{Er} циклу (формула (16)) є невисокою (18%) з причини великих затрат саме на нагрів масивної фази ГЛС, то застосуємо рекуперацію тепла в циклі. Сучасні рекуператори тепла та теплообмінники досягли високих ступенів рекуперації. Це і пластинчасті теплообмінники з ефективністю до 95% [40], і роторні рекуператори тепла з ефективністю рекуперації до 80%. [41]

При ступені рекуперації $R=0,8$ маємо

$$\eta_{R=0,8} = \frac{\delta W_{4-1} - \delta W_{2-3}}{\delta q_{1-2} \cdot (1 - R) + \delta q_{2-3}} \cdot 100\%, \quad (17)$$

$$\eta_{R=0,8} = \frac{0,668}{2,49 \cdot (1 - 0,8) + 1,25} \cdot 100 = 38,2\%. \quad (17 \text{ а})$$

ККД для циклу Єрошенка з рекуперацією тепла до 100% визначається за формулою Карно:

$$\eta_{Car} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (18)$$

$$\eta_{Er} = \eta_{Car} = 1 - \frac{303}{553} = 0,452. \quad (18 \text{ а})$$

Порівняємо ступені картотизації:

$$\frac{\eta_{Er}}{\eta_{Car}} = \frac{17,9}{45,2} = 0,39, \quad (19)$$

$$\frac{\eta_{R=0,8}}{\eta_{car}} = \frac{40,7}{50,2} = 0,81. \quad (19a)$$

Тепло, що викидається в атмосферу в ГЛС-циклі при рівних корисних роботах порівнювальних двох циклів, враховуючи рекуперацію, дорівнює:

$$Q_{eko} = \delta q_{3-4} \cdot (1 - R) + \delta q_{4-1}, \text{МДж}, \quad (20)$$

$$Q_{eko} = 2,49 \cdot (1 - 0,8) + 0,83 = 1,183, \text{МДж}. \quad (20 a)$$

Зведена таблиця основних характеристик двох циклів приведена нижче. В таблицю також було внесено результати розрахунків циклу Єрошенка при перепадах температур і тисків, характерних для циклу Ренкіна при рівній корисній роботі (див.стовпчики 3,4), де радіус каналів матриці ($r = 139 \text{ \AA}$) був вибраний із умови $W_R = W_\Omega = W_{Er} = 0,668 \text{ МДж}$, а $P_2 = P_L = 6,4 \text{ МПа}$.

Нагадуємо, що тиск в системі підбирається таким чином, щоб не допустити процес пароутворення в поровому просторі матриці. При температурі 608 К тиск, при якому починається пароутворення, менше, ніж 6,4 МПа [38]. Тобто, умова " $P_L \geq P_{нас.}(T_1)$ " виконується. У таблиці наведені значення тисків, при яких пароутворення в капілярах апріорно неможливе.

Дискусія

ГЛС – конденсована система, енергетичні перетворення в якій засновані на залежності *потенційної* енергії міжмолекулярної взаємодії від температури процесу [3,24-27]. Нагадаємо, що у традиційних робочих тілах (пара, газ) енергоперетворюючі процеси засновані на використанні залежності *кінетичної* енергії хаотичного руху молекул від температури.

Таблиця 1– Фактори і параметри порівнювальних циклів

№ п/п	Показник	Цикл Ренкіна	Цикл Єрошенка					
			при перепадах параметрів в циклі Ренкіна		При радіусі пор $r=1,5 \text{ \AA}$, при рівних корисних роботах, $\varphi=0,7$ $P_{max} = P_2 = 184,3 \text{ Мпа}^*)$	При радіусі пор $r=3 \text{ \AA}$, при рівних корисних роботах, $\varphi=0,7$ $P_{max} = P_2 = 92,2 \text{ МПа}$	При радіусі пор $r=6 \text{ \AA}$, при рівних корисних роботах, $\varphi=0,7$ $P_{max} = P_2 = 46,1 \text{ МПа}$	При радіусі пор $r=12 \text{ \AA}$, при рівних корисних роботах, $\varphi=0,7$ $P_{max} = P_2 = 23,4 \text{ МПа}$
			$\Delta P=6,39 \text{ МПа}$, $r=139 \text{ \AA}$, $\varphi=0,7$	$\Delta T=250 \text{ К}$, $r=139 \text{ \AA}$, $\varphi=0,7$				
1	$l, \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$	0,000073	0,0186	0,0186	2,267	1,133	0,567	0,283
2	H	0,258	0,003	0,003	0,267	0,178	0,107	0,06
3	$\eta_{\text{карно}}$	0,452	0,452	0,452	0,452	0,452	0,452	0,452
4	$\eta/\eta_{\text{карно}}$	0,571	0,006	0,006	0,592	0,394	0,237	0,131
5	$\eta_{0,8}$	-	0,015	0,015	0,445	0,382	0,297	0,205
6	$\eta_{0,8}/\eta_{\text{карно}}$	-	0,03	0,03	0,985	0,845	0,658	0,456
7	$\Omega \cdot 10^6, **)$ $\text{м}^2/\text{кг } H_2O$	9,46***)	0,144	0,144	13,3	6,6	3,3	1,67
8	$V_p = V_{H_2O}$ $= V_{\text{пор}} \cdot \text{М}^3$	0,001	0,09425	0,09425	0,001	0,002	0,004	0,008
9	$Q_{eko}, \text{МДж}$	2,433	32,3	32,3	0,934	1,183	1,681	2,678

*) - *Гіпотетичне* значення $P_2 = 184 \text{ МПа}$, для $r=1,5 \text{ \AA}$ (значення σ_{H_2O} для таких мікро розмірів невідоме) в експериментах не перевірялось, надається в таблиці як гранично допущене (діаметр молекули води має значення $2,82 \text{ \AA}$)

**) Ω - Питома робоча міжфазна поверхня

***) Величина $9,46 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{кг } H_2O$ - поверхня всіх молекул в 1 кг води - цикл Ренкіна (сухий пар). Це значення було розраховане за формулою $\Omega = N_A \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \mu$, де N_A - число Авогадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$, μ - кількість моль в 1 кг води ($\mu = 55,6 \text{ моль}$)

Реальність тисків 23-92 МПа, при *інтрузії-екструзії* води в пори з радіусами $r = 3 \div 12 \text{ \AA}$ (таблиця, стовбці 6-8) підтверджена в експериментах [21,22]

Як і було передбачено, невисокі значення η для ГЛС-циклу при перепадах температур і тисків, як в циклі Ренкіна (рядок 2, стовпці 2-4), пояснюються тим, що при вказаних початкових умовах треба використовувати матриці с розміром пор 139 \AA (щоб забезпечити потрібний тиск $P_2 = 6,4 \text{ МПа}$ при $T_2 = 303 \text{ К}$), що дає невисокі значення міжфазної поверхні (її зміни) $\Delta\Omega$ при застосуванні 1 кг води. Для того, щоб при заданих P_2 і T_2 прирівняти роботи циклів, потрібно збільшувати об'єм (масу) матриці з розміром пор 139 \AA і масу потрібної води, аби зробити більшою міжфазну поверхню $\Delta\Omega$ в ГЛС. А це призводить до збільшення затрат теплової енергії на нагрів масивної «пасивної» фази ГЛС і до зниження ККД. Проте, навіть за таких «невигідних» для ГЛС-циклу умовах маємо термодинамічну компактність в 1000 разів більше, ніж в циклі Ренкіна (рядок 1, стовбці 2-4).

Вирішальну роль питомої міжфазної поверхні $\Omega \left(\frac{\text{м}^2}{\text{кг } H_2O} \right)$ в перетворенні теплової енергії в механічну можна побачити в стрічці 7. Щоб виконати роботу 0,688 МДж в циклі Ренкіна треба використати 1 кг H_2O і перетворити масивну фазу води в окремі молекули (сухий пар) з загальною їх поверхнею «молекула-вакуум» $9,46 \cdot 10^6 \text{ м}^2$. Беручи до уваги те, що застосування матриць з радіусом пор від 3 \AA до 139 \AA не дозволяє виконати ту ж саму роботу 0,688 МДж в ГЛС-циклі, використовуючи лише 1 кг води, через менше значення питомої міжфазної поверхні «рідина-матриця» в діапазоні $(0,144 \div 6,6) \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{кг}$. Замість того, щоб розділяти воду на окремі молекули шляхом випаровування в циклі Ренкіна, в ГЛС-циклі відбувається дрібнення масивної фази води за допомогою жорстких матриць на окремі кластери (десятки чи сотні молекул в мікрокаплях води). Наявність кластерів, а не окремих молекул в поровому просторі матриць, зменшує сумарну поверхню «рідина-матриця» як джерело вільної енергії і, відповідно, величину корисної роботи в циклі. Для того, щоб підвищити цю поверхню у великих кластерах (мікрокаплях) доводиться збільшувати кількість води в ГЛС-циклі, яка підлягає диспергуванню від 1 до 8 кг (рядок 8, стовпчики 5-8). Із таблиці видно, що по мірі збільшення радіуса пор/капілярів (стрічка 7 стовбці 3-8) в ГЛС-циклі, доводиться збільшувати кількість задіяної води, що знижує питому (вагову) міжфазну поверхню ($\text{м}^2/\text{кг}$), але забезпечує загальну поверхню в $13,3 \cdot 10^6 \text{ м}^2$, яка гарантує виконання роботи в 0,688 МДж в ГЛС-циклі, як в циклі Ренкіна.

Щоб показати всі можливості циклу на базі гетерогенної ліофобної системи, потрібно змінити її початкові параметри (наприклад, зменшити радіус пор/капілярів). Промислово ефективним є значення радіусів на рівні $3 \div 6 \text{ \AA}$ (дивись стовбці 6,7). При цих параметрах можливо отримати суттєво кращі показники ефективності ГЛС-циклу. Так як велика частина затраченої в циклі теплової енергії йде на нагрів δq_{1-2} та охолодження δq_{3-4} масивної (а не поверхневої) фази системи, то це дає можливість використати в ГЛС-циклі рекуператори тепла δq_{3-4} для використання його в процесі 1-2 циклу. Теоретично ми можемо досягти рівня рекуперації 90%, використовуючи пластинчасті теплообмінники [40]. В розрахунках прийємо рівень рекуперації 80% [41].

За таких умов отримуємо вищу ступінь карнотизації ГЛС-циклу η_{Er}/η_{Car} (див.ряд 6, стовпці 6,7), ніж у циклі Ренкіна (див.ряд 4, стовбець 2). Але для цього треба перейти на більший тиск P_2 (46-92 МПа) в робочому такті циклу. Тиски рівня 38 МПа вже застосовуються в сучасній теплоенергетиці [42]. Саме на такому шляху конструювання теплових машин (зменшення радіусу пор/капілярів матриць і підвищення тиску робочого такту) можливо розкрити весь потенціал ГЛС-циклу.

В новому циклі, використовуючи капілярно-пористі матриці з діаметром пор капілярів 3 \AA , можна досягти зменшення теплового забруднення навколишнього середовища не тільки завдяки зниженню кількості джоулів, які викидаються у живу природу (дивись ряд. 9, стовпці 2,6), але, головне, з причини меншої температури T_2 , при якій здійснюється робочий такт в ГЛС-циклі. Нагадаємо, що в усіх традиційних теплових машинах світу на протязі двох віків робочий такт здійснюється завжди при високій температурі T_1 , тому гарячі газ/пара на виході сучасних теплових машин завдають нищівних руйнувань навколишньому середовищу.

Термодинамічна компактність циклу Єрошенка за умов: « $P=92,2 \text{ МПа}$, $T=303 \text{ К}$ » досягає неймовірної величин $1133 \text{ МДж}/(\text{м}^3\text{К})$, що майже в 32 тисячі разів вище, ніж в циклі Ренкіна (див. ряд 1, стовпчики 2,6). А це відкриває перспективи радикального зниження потреби в конструкційних матеріалах в енергомашинобудуванні і зменшення габаритів теплових машин нового класу. Присутність рекуператорів тепла в ГЛС-циклі не набагато зменшить показник ТК.

Формулу (19) можна записати у іншому вигляді, посилаючись на [9,10]:

$$\frac{\eta_{Er}}{\eta_{Car}} = \frac{1}{1 + r \cdot \frac{k \cdot C_V}{\frac{d\sigma}{dT} \cdot \cos\theta} \cdot \eta_{Car}} \quad (21).$$

Формула (21) вказує, що збільшення ступеня карнотизації ГЛС-циклу на практиці можна досягти шляхом зменшення радіусів r пор/капілярів матриці, питомої (об'ємної) теплоти C_V ГЛС (Дж/м³К) та збільшення температурного коефіцієнта поверхневого натягу рідини $\frac{d\sigma}{dT}$ (н/м*К) і контактного кута «незмочування» (через зростання модуля $\cos \theta$).

Розрахунки (див. мал. 5) показують, що застосування матриць з радіусом пор/каналів 3 Å зрівнює ККД двох циклів (мал.5а), а при радіусах 5 Å досягається однакова ступінь їх карнотизації (мал.5б). Подальше диспергування рідини при застосуванні матриць з меншими радіусами пор/каналів, ніж (3-5) Å, робить ГЛС-цикл більш ефективним, ніж цикл Ренкіна. Досконалі технології виробництва пористих матеріалів в сучасній хімічній промисловості, включаючи нанотехнології, дозволяють створити гідрофобні матриці з радіусами $r=3$ Å і пористістю $\phi=0,7$ і сподіватись на успішне впровадження ГЛС в промисловість.

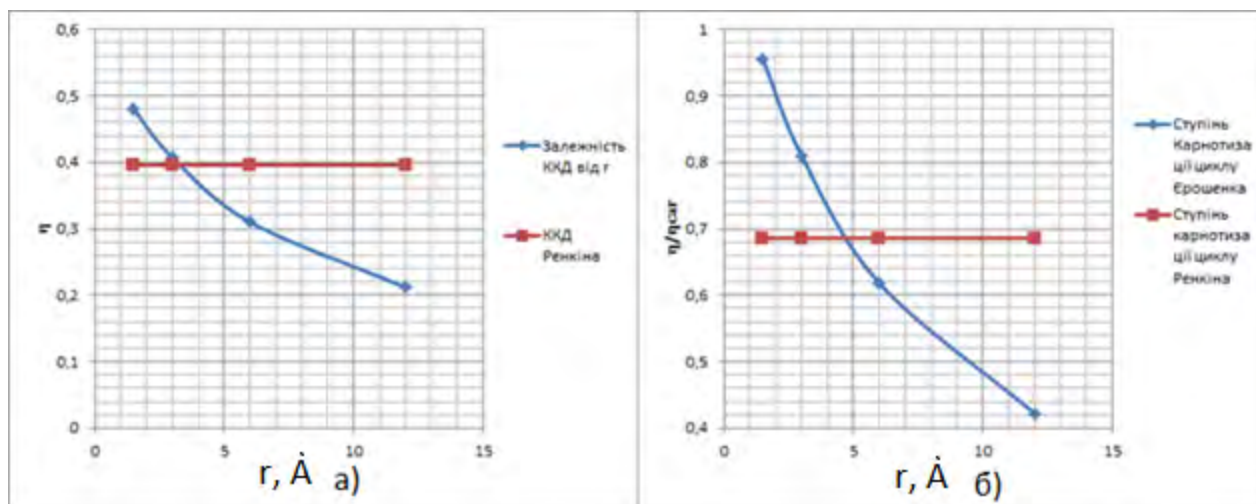


Рисунок 5 - Залежність η і η/η_{car} від радіуса r пор/каналів матриці для ГЛС-циклу з параметрами, вказаними в таблиці

Парадоксальний вплив ККД Карно на ступінь карнотизації ГЛС-циклу (остання зменшується з ростом ККД Карно (21)), насправді, має важливе практичне значення, бо дає слушну рекомендацію для інженерів-енергетиків: ГЛС-цикл є найбільш ефективним серед всіх відомих термодинамічних циклів при використанні *низькотемпературних* джерел теплової енергії (геотермальних, теплоти морів та океанів, низькотемпературних промислових викидів пари та газу тощо), бо повнота перетворення теплоти вказаних джерел в механічну роботу (величина відношення $\frac{\eta_{er}}{\eta_{car}}$) збільшується зі зниженням ККД Карно (21).

Так як максимальна робоча температура в ГЛС-циклі не піднімається вище 370 °С в розглянутих прикладах (для води-пари), то даний цикл можна використовувати для утилізаторів тепла з додатковим виробництвом корисної роботи (наприклад, після традиційних ГТУ). Для порівняння: в газотурбінній установці типу ГТ-100-3М температура газів на виході становить 398 °С, а її ККД становить 35% [43]. Розрахунки циклу Єрошенка проводились для температури нагрівача $T_1=305$ °С. Вже зараз можна припустити, що ККД нової силової установки на базі ГЛС-циклу буде на рівні 76%, при цьому без потреб у додатковому догріву вихідних газів після ГТУ (як це звичайно використовується в котлах-утилізаторах). Звісно, що вказані пропозиції потребують додаткових, більш детальних термодинамічних розрахунків та експериментів.

Висновки

Сучасний стан «Термомолекулярної енергетики», яка базується на використанні потенціальної енергії міжмолекулярної взаємодії на суперрозвинених міжфазних поверхнях в конденсованих ліофобних системах «рідина+тверда капілярно-пориста матриця, незмочувана цією рідиною» для здійснення різноманітних термодинамічних перетворень в термомеханічних системах, дає наукові і технологічні підстави для розгортання проектно-конструкторських робіт з метою своєчасного впровадження в тепловій і атомній енергетиці нового закритого ГЛС-циклу (циклу Єрошенка з зовнішнім теплопідводом), показники якого можуть перевищити відомі техніко-економічні характеристики циклу Ренкіна.

Кінцевий успіх нової енерготехнології на базі ГЛС/ПК пов'язаний насамперед з можливістю безпечного і надійного використання високих тисків в *конденсованих* системах, якими є ГЛС (повна відсутність пари/газу в робочих камерах нових енергоустановок). Тиск (н/м² = Дж/м³) – це питома об'ємна енергія речовини, тому для *конденсованих* систем вона завжди вище, ніж для *стискуваних* газів/пара.

Серед потенціальних переваг циклу Єрошенка порівняно з циклом Ренкіна (при однакових значеннях отриманих механічної роботи і ККД) можна виділити наступні:

– термодинамічна компактність ГЛС-циклу в декілька десятків тисяч разів перевищує аналогічні показники теплосилових установок Ренкіна, це означає можливість радикального зниження витрат конструкційних матеріалів в теплосилових установках або двигунах Єрошенко завдяки суттєвому зниженню об'єму робочої камери і відсутності парогенератора і конденсатора пара, які являються невід'ємними компонентами традиційних теплосилових установок Ренкіна;

– величезна термодинамічна компактність дає можливість суттєво зменшити габарити теплосилової ГЛС-установки і встановлювати її в місцях, непристосованих для безпроблемного застосування циклу Ренкіна (наприклад, в малій енергетиці, на кораблях і підводних човнах, на транспортних засобах тощо).

– вагоме зниження теплового забруднення навколишнього середовища можна досягнути через відсутність конденсаторної установки пари і можливість рекуперації теплової енергії в ГЛС-циклі, а також завдяки тому, що робочий такт в ГЛС-циклі виконується при температурі холодильника T_2 (безпрецедентне явище в технічній термодинаміці);

- безшумність роботи двигунів (енергоустановок) завдяки капілярному характеру швидкісного руху рідини в поровому просторі матриць (малі переміщення кластерів рідини) та відсутність газової (парової) складової в ГЛС/ПК знижує рівень шумного забруднення навколишнього середовища.

Враховуючи те, що сучасна хімічна промисловість щороку видає на світовий ринок нові пористі матеріали з величезним значенням питомої поверхні (до $2000 \frac{m^2}{g}$), можна припустити, що їх застосування в ГЛС/ПК буде і надалі. Все це дає можливість підвищити термодинамічну та технологічну ефективності нового ГЛС-циклу. При збігу в часі попиту з боку суспільства (а це - виклики епохи енергетичної кризи) і пропозиції з боку розробників нової техніки (наявність на цей час конструктивних і технологічних рішень в Термомолекулярній енергетиці) можна надіятись на появу в найближчі роки в теплової і атомній енергетиці альтернативи циклу Ренкіна.

Список літератури

1. *Єрошенко В.А.* // Предельный КПД или максимальная термодинамическая компактность тепловых двигателей? / Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт – 1987, №2 – С. 125 – 133.
2. *Єрошенко В.А., Аистов В.И.* // Оптимизация циклов тепловых двигателей по термодинамической компактности // Изд. АН УССР, Промышленная теплотехника, – 1990, №3 – С. 60-64.
3. *Єрошенко В.А.* // Термомолекулярная энергетика // Промышленная теплотехника - 1992, №14 – С. 22–25.
4. *Єрошенко В.А.*, Необычные свойства одной сложной термодинамической системы // Доклады АН УССР. Сер. А.: Физ.-мат. и тех. науки – 1990. №. 10 – С. 79-82.
5. *Eroshenko V.A.*, Dimensionnalité de l'Espace Comme Potentiel Thermodynamique d'un Système. Entropie, 1997, 202, p.110.
6. *Пат. 1,254,811 А СССР (1981–ДСП) – РФ (1993), F 03 G 7/00.* Гетерогенная термодинамическая система, способ Єрошенко преобразования тепловой энергии в механическую и устройство для его осуществления / В.А. Єрошенко; заявл. 24.07.1981 (ДСП); опубл. 30.09.1996, Бюл. №3
7. *Valentin Eroshenko* // Structure heterogene d'accumulation ou de dissipation d'energie, procedes d'utilisation d'une telle structure et appareils associes. Pat. International WO 96/18040, 13.06.1996.
8. *Valentin Eroshenko* // Heterogeneous structure for accumulating or dissipating energy, methods of using such a structure and associated devices, US Patent 6.052.992, Apr. 25.2000
9. *Єрошенко В.А., Ярош Т.Л.* // Синтез жидкостей с большим значением температурного коэффициента поверхностного натяжения – перспективный путь энерго- и материалосбережения, Наукові вісті НТУУ “КПІ”, 2012, №2 – С.37-49..
10. *Eroshenko V.A., Popyk A.* // Current Status and Perspectives of Thermomolecular Engine Developments, International Journal of Thermodynamics, 2014, Vol. 17, №1, pp. 33 – 41.
11. *Eroshenko V.A.* // Amortisseur a Haut Pouvoir Dissipatif. French Patent, 2000, № FR 2804188 A1. Damper with high dissipating power, U.S. Patent №6,615,959(2003).
12. *Eroshenko V.A.* // Virtually oil-free shock absorber having high dissipative capacity. U.S. Patent Application 13/820,977, 2011.
13. *Suciu C.V., Iwatsubo T. and Deki S.* // Investigation of a colloidal damper. Journal of colloid and interface science. 2003, 259(1), pp. 62 – 68.
14. *Suciu C.V. and Yaguchi K.* // Endurance tests on a colloidal damper destined to vehicle suspension. Experimental mechanics, 2009, 49(3), pp. 383 – 393.
15. *Eroshenko V.A.* // A new paradigm of mechanical energy dissipation. Part 1: theoretical aspects and practical solutions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2007, pp. 285 – 300.
16. *Eroshenko V.A., Piatiletov I., Coiffard I., Stoudenets V.* // A new paradigm of mechanical energy dissipation. Part 2: experimental investigation and effectiveness of novel car damper. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2007, 221(3), pp. 301 – 312.

17. *Sucie C.V., & Kimura Y* (2012). Experimental study on the forced heating and natural cooling of a colloidal damper. *Journal of System Design and Dynamics*, 2012, 6(5), pp. 538-554
18. *Ерошенко В.А., Студенец В.П., Пятилетов И.И., Щученко В.Ю* // Применение репульсивных клатратов для устройств и систем обеспечения сейсмостойкости и систем обеспечения сейсмостойкости сооружений. Строительство и техногенная безопасность. Сборник научных трудов, Симферополь, 2011, выпуск 35, сс. 127-132.
19. *Ерошенко В.А.* // Гидрокапиллярный аккумулятор, Пат. СССР 943444, опуб. 15.07.1982. бюл. №26
20. *Ерошенко В.А.* // Гидрокапиллярный аккумулятор Ерошенко, Пат. SU 1333870 А1, опуб. 30.08.1987, бюл. №32,
21. *Eroshenko V.A., Regis R.C., M. Soulard, J. Patarin* // Les systemes hétérogènes «eau-zeolithe hydrophobe»: de nouveaux resorts moléculaires // *Comptes Rendus. Physique.* – 2002. – No. 25- С. 111-119.
22. *Eroshenko V.A., Regis R.C., M. Soulard, J. Patarin* // Energetics: a new field of applications for hydrophobic zeolites // *Journal of the American Chemical Society.* – 2001. – С. 114-131.
23. *Eroshenko V.A. and Grosu Ya.G.* Thermodynamic and Operational Properties of Heterogeneous Lyophobic Systems // *International Journal of Thermodynamics*, 2013, №1, p. 1-9.
24. *Eroshenko V. A.*, Russian-Soviet Patents № 943,444 (1980); 1,382,078 (1982), 1,380,357 (1983),
25. Пат. 1380357 А2 СССР (1983-ДСП) – РФ (1993), F 03 G 7/00. Способ Ерошенко преобразования тепловой энергии в механическую / *В.А. Ерошенко*; заявл. 30.11.1983 (ДСП); опубл. 30.09.1996, Бюл. № 3.
26. Пат. 1452262 СССР (1986-ДСП) – РФ (1993), А1 F03 G 7/00. Роторный тепловой двигатель Ерошенко / *В.А. Ерошенко*; заявл. 16.06.1986 (ДСП); опубл. 30.09.1996, Бюл. №3.
27. *Eroshenko V. A.*, Russian-Soviet Patents № 1,333,870 (1985), 1,434,881 (1985), 1,452,262 (1986), 1,508,665 (1987).
28. *Ерошенко В.А., Ткаченко С.Г.* // Эффект гипердилатометрии одной сложной термодинамической системы // *Український фізичний журнал* – 1993. № 12. – С. 1789-1792.
29. Патент Российской Федерации. RU (11) 2138086 (13) CI (2002). Тепловое чувствительное пусковое устройство / *В.С. Егоров, А.Г. Портяной, А.П. Сорокин, В.Г. Мальцев, Р.М. Вознесенский.*
30. *Laouir A., L.Luo, D. Tondeur, T. Cachot, P. Le Goff* / Thermal machines based on surface energy of wetting: Thermodynamic analysis / *AIChE Journal.* – 2003, - No. 3 – с. 764-781.
31. Андрущенко А.И., Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок, Москва, Высшая школа 1985, 319 с..
32. Крутов В.И., Техническая термодинамика, Москва «Высшая школа» 1991, 382 с..
33. *Lehn, J. M.*. "Perspectives in Supramolecular Chemistry—From Molecular Recognition towards Molecular Information Processing and Self-Organization". *Angewandte Chemie International Edition in English* (1990) **29** (11): 1304 с..
34. *V.A. Eroshenko* // Repulsive Clathrates. A New Operational Material for Efficient Seismic Isolation // *Int. Conf. Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Seismic Vibrations of Structure, Sicily, Italy, Aug. 25-27.1997*, p.p. 783-794.
35. *Ерошенко В.А., Лазарев Ю.Ф.* // Реология и динамика репульсивных клатратов // *Прикладная механика и техническая физика.* – 2012. №. 1 – С. 114-131.
36. *Ерошенко В.А., Гросу Я.Г.* // Соотношения Максвелла и термические коэффициенты для репульсивных клатратов // *Журнал технической физики.* 2013. - №.8 – С.1 – 7.
37. *Reis T.* // *Introduction à la chimie-physique des surfaces.* – «Dunod» (fr.), Paris: 1952, 286. p..
38. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* // Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Москва. Издательство МЭИ, 160 с..
39. *Физические величины, Справочник, Григорьев И.С., Мейлихов Е.З., 1991* // Москва, Энергоатомиздат, 1991, 1231 с..
40. Реальный КПД пластинчатых теплообменников / *Металекспортпром* :<http://www.ural-mer.ru/plastinchatie-teploobmenniki-v-chelyabinske/realniie-kpd-plastinchatih-teploobmennikov.html>
41. Роторный рекуператор для напольных приточно-вытяжных установок с рекуперацией Ventus VS 21-650, 2015, ООО «СКС» - Киев: <http://www.vts.com.ua/rotor.html>
42. *Т. Склярлова*, Сверхкритический и суперсверхкритический параметры в электроэнергетике, интервью Rana Bose журналу Velan View, Перевод Т. Скляровой, ЗАО «Завод «Знамя Труда», 2012.
43. Газотурбинные установки (ГТУ). <http://www.mosenergoinform.ru/articles/gtu.htm>

V.A Eroshenko, A.V. Tyshkovets, V.O. Bublei

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

ABOUT THE POSSIBILITY OF USING CYCLE EROSHENKO LIKE ALTERNATIVELY RANKINE CYCLE IN THE POWER INDUSTRY

In the article the comparative analysis cycle Rankine is presented with the cycle Eroshenko which is based on condensed heterogeneous lyophobic systems.

A significant advantage of the cycle Eroshenko is the compact thermal power installation without a phase transition "water-steam", it allows to use of these units in areas with limited space (vehicles, space vehicles, submarines, etc.), as well as the maneuvering units of different capacities to cover peak loads. Although attractive and environmental component, as silent installation, and its production requires much lower material costs and reduced thermal pollution to the environment.

Given the potential Eroshenko cycle, and its technical capabilities, the cycle can be regarded as a promising solution for energy problems, including the exit of Ukraine's energy crisis.

Keywords: thermomolekular energy, heterogeneous lyophobic system interphase, intrusion, extrusion, thermodynamic compactness, heat recovery.

УДК 621.620.036.7+536.7+541.12+541.18+541.532.6+541.532.264

**В.А. Ерошенко, д-р техн. наук, профессор, А.В. Тишковець, магистр, В.А. Бублей, магистр
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИКЛА ЕРОШЕНКО КАК АЛЬТЕРНАТИВЫ ЦИКЛУ
РЕНКИНА В ЭНЕРГЕТИКЕ**

В статье представлен сравнительный анализ цикла Ренкина с циклом Ерошенко на основе конденсированных гетерогенных лиофобных систем.

Существенным преимуществом цикла Ерошенко являются компактные размеры теплосилового установи без фазового перехода «вода-пар», это позволяет использовать данные установи в местах с ограниченным пространством (транспортные средства, космические аппараты, подводные лодки и другое), а также как маневренные блоки различной мощности для покрытия пиковых нагрузок. Кроме того, привлекательна и экологическая составляющая, так как установи бесшумны, а на свое производство требуют значительно меньших материальных затрат, а также уменьшается тепловое загрязнение окружающей среды.

Учитывая потенциал цикла Ерошенко и его технические возможности, цикл можно считать перспективным для решения энергетических проблем, в том числе и для выхода Украины из энергетического кризиса.

Ключевые слова: термомолекулярная энергетика, гетерогенная лиофобная система, межфазная поверхность, интрузия, экструзия, термодинамическая компактность, рекуперация тепла.

Надійшла 16.06.2015

Received 16.06.2015

УДК 621.311.019

Ю.П. Матеенко, С.В. Казанский, А.С. Лунин

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЫНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Проведен сравнительный анализ методов определения надежности структурных схем электростанций на стадии проектирования. Рассмотрены особенности оценивания надежности структурных схем электростанций с учетом функционирования рынка электрической энергии.

Цель исследования: повышение эксплуатационной надежности структурных схем электростанций и снижение количества недоотпущенной электрической энергии.

Методика реализации: внедрение современных алгоритмов и программ оценки надежности структурных схем.

Результаты исследования: проанализированы основные методы анализа надежности структурных схем электростанций, получены численные значения интегрального показателя надежности в зависимости от количества отказов в схеме.

Выводы: показаны преимущества применения метода марковских случайных процессов для анализа надежности структурных схем электростанций, как на этапе проектирования, так и в условиях эксплуатации или реконструкции.

Ключевые слова: электростанция, структурная схема, надежность, методы анализа.

Для оценки надежности структурных схем электрических станций можно использовать ряд методов основанных на теории вероятности [1]. Критерием надежности методов является количество недоотпущенной электроэнергии.

Для оценки надежности структурных схем была выбрана схема электростанции с распределительными и устройствами высшего напряжения (ВН) 330 кВ и среднего напряжения (СН) 110 кВ, соединенными автотрансформаторами (рис. 1).

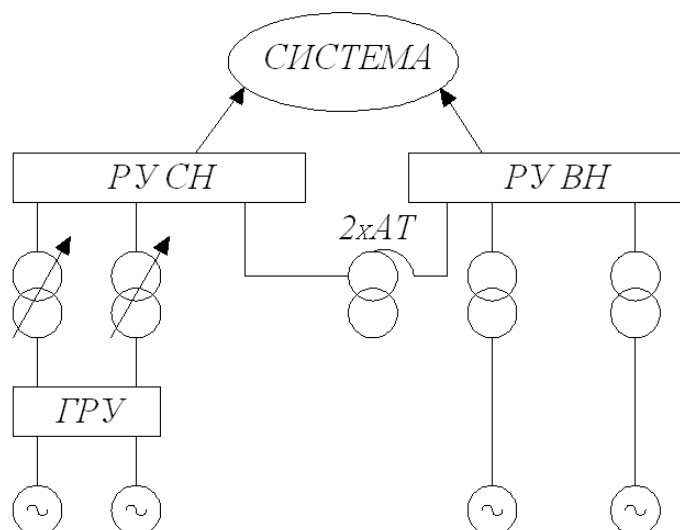


Рисунок 1 – Структурная схема электростанции

В качестве исследуемых методов были выбраны следующие методы [2]:

1. Вероятностный.
2. Минимальных сечений.
3. Деревя отказов.
4. Марковских случайных процессов.

Вероятностный метод позволяет оценить надежность схемы за счет превращения всей схемы в один эквивалентный элемент. Это эквивалентирование достигается путем складывания параллельных и последовательных элементов схемы.

Метод минимальных сечений позволяет дать количественную оценку надежности без полного эквивалентирования схемы. Задача сводится к нахождению минимальных сечений, т.е. минимальному количеству элементов, отказ которых приведет к отказу всей схемы.

Метод дерева отказов основан на систематическом анализе событий, которые могут вызвать отказ системы. Деревом отказов называют логическое дерево, в котором ветви представляют собой события, приводящие к отказу системы, подсистемы или элементов.

При экспоненциальном законе распределения времени восстановления и времени между отказами для расчета показателей надежности установки с восстановлением пригоден математический аппарат марковских случайных процессов. Данный метод допускает, что один элемент установки или сама установка без резервирования могут находиться в двух состояниях: E_1 – работоспособное, E_0 – неработоспособное. Если λ – интенсивность отказов, а μ – интенсивность восстановления, и $\mu = 1/\tau$, то граф переходов из состояния в состояние с обозначением вероятностей переходов за время Δt будет иметь вид, представленный на рис. 2.

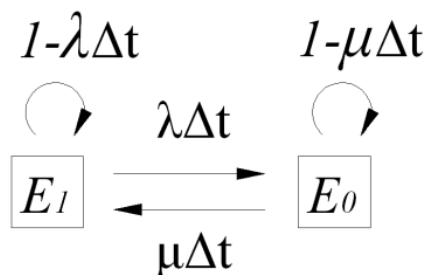


Рисунок 2 – Модель надежности объекта с восстановлением

Обозначим через $P_1(t)$ вероятность того, что в момент t установка находится в состоянии E_1 , а через $P_0(t)$ – вероятность того, что в момент t находится в состоянии E_0 . Тогда дифференциальные уравнения относительно вероятностей переходов:

$$\begin{aligned} P'_1(t) &= -\lambda P_1(t) + \mu P_0(t); \\ P'_0(t) &= \lambda P_1(t) - \mu P_0(t). \end{aligned}$$

При начальных условиях $P_1(0) = 1, P_0(0) = 0$ и условии, что состояния E_1 и E_0 представляют собой полную группу событий, т.е. $P_1(t) + P_0(t) = 1$, решение дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu}\right) \left(1 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right) \exp(-(\mu + \lambda)t)\right); \\ P_0(t) &= \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu}\right) (1 - \exp(-(\mu + \lambda)t)). \end{aligned}$$

Таким образом, метод марковских случайных процессов позволяет дать оценку по надежности в течение определенного периода времени. В примере за расчетный период брался интервал до 5 месяцев после пуска станции.

Критериями выбора структурной схемы являются наименьшие вероятность отказа всей схемы и количество недоотпущенной электроэнергии с шин ВН. Расчеты проводились для электрической станции мощностью 320 МВт (2х60, 2х100). Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1– Результаты расчета надежности структурной схемы

Метод	Вероятность отказа схемы, $Q_{сх}$	Недоотпуск электроэнергии, $M, \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{год}}$
Вероятностный	$1,583 \cdot 10^{-9}$	$1,109 \cdot 10^{-3}$
Минимальных сечений	$1,603 \cdot 10^{-9}$	$1,123 \cdot 10^{-3}$
Дерева отказов	$3,222 \cdot 10^{-8}$	0,023
Марковских случайных процессов (за рассматриваемый месяц)	0	0
	1	$1,597 \cdot 10^{-5}$
	2	$2,219 \cdot 10^{-4}$
	3	$9,616 \cdot 10^{-4}$
	4	$2,594 \cdot 10^{-3}$
	5	$5,408 \cdot 10^{-3}$

Как видно из табл. 1, метод минимальных сечений и вероятностный метод дали практически одинаковые результаты, что объясняется схожим подходом к решению. В этих методах используется эквивалентирование схемы, только в вероятностном – полное, а в методе минимальных сечений – частичное. Данные методы требуют много расчетов, но при этом относительно просты и могут быть легко реализованы на ЭВМ [3].

Метод дерева отказов по результатам отличается от двух предыдущих. Это связано с тем, что данный метод включает в себя все возможные варианты отказов элементов, которые приводят к отказу схемы, т.е. учитывает все сечения. Дерево отказов для рассматриваемой схемы показано на рис. 3.

Метод дерева отказов не требует много вычислений и является достаточно наглядным, что позволяет отследить по ветвям дерева, какие именно элементы влияют на ту или иную аварию. Однако данный метод не подходит для схем с большим количеством элементов.

Метод марковских случайных процессов позволяет дать оценку надежности структурной схемы электрической станции на любом временном промежутке. Таким образом, можно проследить динамику изменения не только отдельных элементов или цепочки элементов, но и количество недоотпущенной электроэнергии.

Особенности оценки надежности структурных схем электростанций в условиях функционирования рынка электрической энергии

В условиях функционирования либерализованных рынков электрической энергии (рынка двусторонних договоров и балансирующего рынка) проблема обеспечения надежности выдачи мощности и, соответственно, баланса в энергосистеме, приобретает особую актуальность [4].

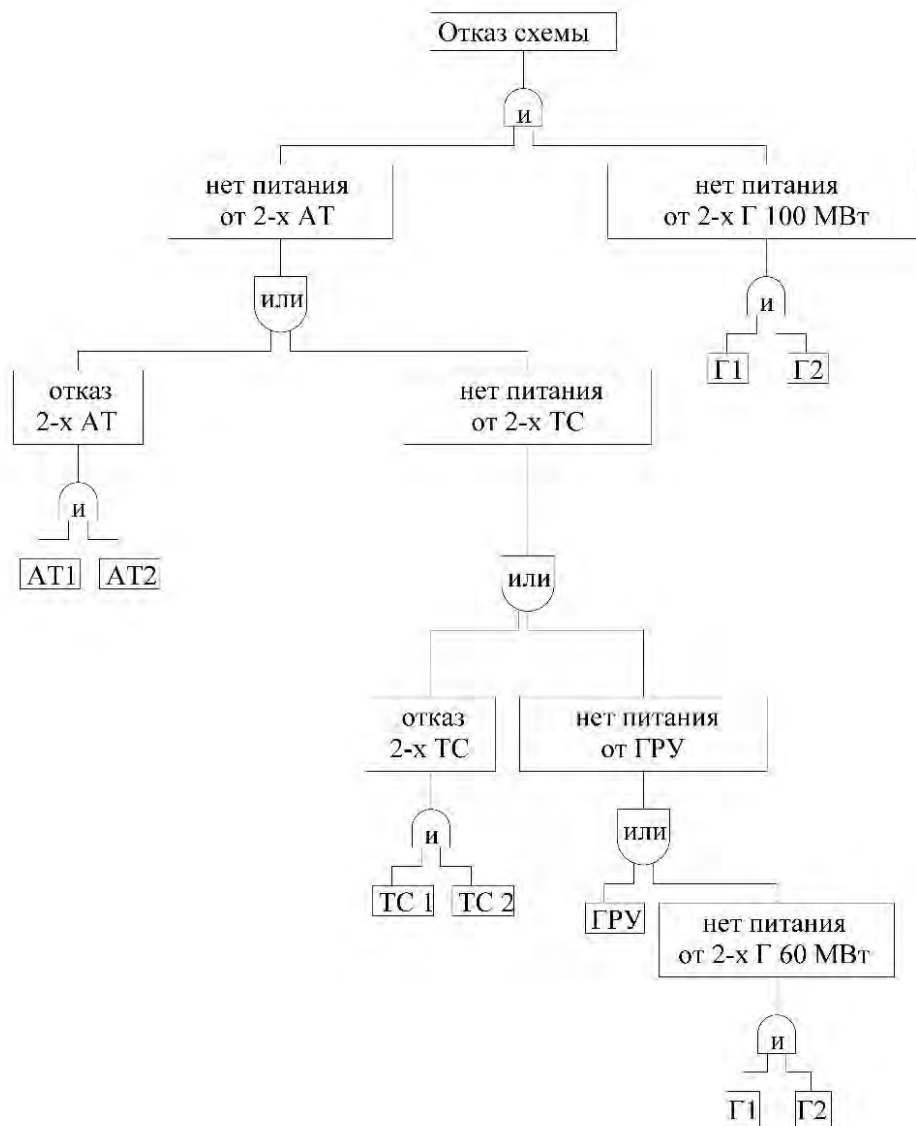


Рисунок 3 – Дерево отказов рассматриваемой структурной схемы

С введением конкурентных отношений изменяются цели управления в электроэнергетической отрасли. Изменение приоритетов от достижения минимума расходов всей отрасли до максимума прибыли отдельных субъектов рынка часто отодвигают вопрос обеспечения надежности на второй план.

С внедрением рыночных отношений изменяются правовые, экономические, структурные и организационные формы функционирования субъектов электроэнергетики, поэтому проблемы обеспечения надежности необходимо рассматривать с учетом этих изменений.

Новая концепция обеспечения надежности должна быть основана на методологии системного подхода с учетом рыночных отношений между субъектами, содержать комплекс задач энергетики по критериям принятия решений, а также порядок совместного участия субъектов рынка в обеспечении системной надежности энергоснабжения потребителей.

При реформировании электроэнергетической отрасли и внедрении рыночных конкурентных отношений ответственность за надежность электроснабжения распределяется между многими субъектами рынка, повышает роль координации, выработки правил и принципов обеспечения надежности [5].

Критерием оценки эффективности обеспечения надежности энергоснабжения потребителей может быть, например, минимум затрат на единицу потребленной энергии. Этот критерий не противоречит интересам производителей энергии, электропередающих организаций и отвечает интересам потребителей.

Надежность схемы выдачи мощности H определяется как отношение разности между полным контрактным (договорным) отпуском $E_{\text{полн}}$ и объемом недоотпущенной мощности с шин $E_{\text{нед}}$ вследствие аварий и отказов:

$$H = \frac{E_{\text{полн}} - E_{\text{нед}}}{E_{\text{полн}}} \cdot 100\%$$

Общий ущерб от недоотпущенной электроэнергии Y_n состоит из нескольких составляющих:

$$Y_n = Y_{EC} + Y_{EP} + Y_{ПOTP}$$

где Y_{EC} – ущерб электростанции; Y_{EP} – ущерб передающей системы; $Y_{ПOTP}$ – ущерб потребителей электроэнергии.

Экономический ущерб состоит из дополнительных затрат на ремонт, стоимости дополнительных потерь электроэнергии, связанных с отклонением режима электрической сети от номинального, стоимости топлива на пуск энергоблоков при остановке агрегатов электростанций, затрат на демонтаж и транспортировку оборудования, на ремонт, затрат на содержание резервного оборудования, а также из ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям вследствие аварийных отключений.

Ущерб Y_s s -го предприятия от перерыва электроснабжения определяется по соотношению:

$$Y_s = \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{l=1}^{N_l} \Lambda(l, k) \cdot [y_n(l) + 8760 \cdot y_t(l) \cdot \tau(l, k)],$$

где $k=1,2,3,\dots,N_k$; $l=1,2,3,\dots,N_l$; N_k – количество аварий с возникновением перерыв электроснабжения; N_l – количество потребителей электроэнергии на одном предприятии; $\Lambda(l, k)$ – частота аварий k -го вида с отключением l -го потребителя электроэнергии; $y_n(l)$ – удельный ущерб от одного перерыва электроснабжения l -го потребителя; $y_t(l)$ – удельный ущерб за один час перерыва электроснабжения l -го потребителя; $\tau(l, k)$ – среднее время восстановления электроснабжения l -го потребителя.

В условиях рыночных отношений, где каждый участник стремится обеспечить себе получение максимальной прибыли, выявление эффективных направлений повышения надежности электроснабжения заслуживает особого внимания. Это позволяет сформулировать основные концептуальные предложения по проведению инвестиционной политики для обеспечения надежного энергоснабжения.

С учетом вышеизложенного, в качестве критерия экономической оценки эффективности внедрения мероприятий по повышению надежности можно принять интегральный эффект $\mathcal{E}_{\text{инт}}$:

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = \sum_{t=0}^T (R_t - B_t) \cdot \frac{1}{(1+E_t)^t},$$

где T – период расчета; t – номер шага; R_t – результаты, полученные на t -м шаге расчета; B_t – затраты на реализацию мероприятий по повышению надежности на t -м шаге расчета; E_t – норма дисконтирования на t -м шаге расчета.

Дополнительными критериями эффективности могут быть индекс доходности, внутренняя норма доходности, срок окупаемости капиталовложений и другие показатели.

Расходы на развитие и функционирование электрогенерирующих мощностей определяются уровнем установленной мощности N на основе соотношения:

$$N = \frac{W}{h(1-\alpha_{ch})(1-\gamma_{втр})},$$

где W – количество дополнительно выработанной и отпущенной электроэнергии в результате реализации мероприятий по повышению надежности; h – количество часов использования установленной мощности агрегатов ЭС; α_{ch} – доля электроэнергии, используемой на собственные нужды агрегатов ЭС; $\gamma_{втр}$ – относительное значение потерь электроэнергии в сетях.

Выводы. Проведенный сравнительный анализ методов оценки надежности структурных схем электростанций свидетельствует о том, что практически все рассмотренные методы дают приемлемые результаты. Выбор метода зависит от желаемой точности расчетов, при этом оптимальным сочетанием точности и эффективности характеризуется метод марковских случайных процессов.

При сравнительном определении надежности структурных схем электростанций в условиях функционирования рынка электрической энергии необходим комплексный анализ затрат и ущерба всех участников рынка, связанных с производством, передачей и распределением электрической энергии.

Список литературы:

1. Гук Ю.Б., Синенко М.М., Тремясов В.А. Расчет надежности схем электроснабжения /.-Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отд., 1990. -216 с.
2. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике: Учеб. пособие для вузов.-Л.: Энергоатомиздат, 1990.-208 с.
3. Электрическая часть электростанций. / Под ред. С.В. Усова. – Л.: Энергия, 1987. -616 с.
4. Письменна У.Є. Ринки електричної і теплової енергії в Україні: структура, ціноутворення і регулювання // НАН України, Ін-т екон. та прогноз. – К., 2008.– 208 с.: табл., рис.
5. Дубровская Е.Ю. Стимулирующее регулирование как инструмент долгосрочной государственной политики развития распределительных компаний // Электропанорама. – 2012, №4 – 5.

Y. Mateyenko, S. Kazanskiy, A. Lunin

RELIABILITY CALCULATION OF BLOCK SCHEMES OF ELECTRIC POWER PLANTS IN TERMS OF FUNCTIONING OF ELECTRICITY MARKET

A comparative analysis of the methods for determining the reliability of block schemes of electric power plants at the design stage was carried out. The features of reliability evaluation of electric power plants block schemes were considered in terms of functioning of the electricity market.

Objective: to increase the operational reliability of electric power plants block schemes and to reduce the probability of electricity undersupply.

Technique of realization: the implementation of modern algorithms and programs for evaluation of the reliability of block schemes.

Results: The main methods of analysis of the reliability of electric power plants block schemes were analyzed, numerical values of integral reliability index were obtained according to the number of failures in the circuit.

Conclusions: It was shown that the Markov processes method applied for the analysis of reliability of the block schemes of electric power plants is advantageous both at the design stage and in operation or reconstruction.

Keywords: electric power plants, block scheme, reliability, analysis methods.

References:

1. Hook Y.B., Sinenko M.M., Tremyasov V.A. Calculation of reliability of power supply circuits /.-L: Energoatomizdat, Leningrad. dep, 1990.
2. Hook Y.B. Theory of reliability in electricity: Tutorial for colleges.-A.: Energoatomizdat, 1990.
3. Electrical power. / Ed. Usov S.V. - L.: Energy, 1987.
4. U. Pysmenna Markets of electric and thermal energy in Ukraine: structure, pricing and adjusting // of NAS of Ukraine, Institute of economy and prognostication - Kyiv, 2008. – 208 p.s.:
5. O. Dubrovska The stimulant adjusting as instrument of longterm public policy of development of distributive companies // Electropanorama.–2012, № 4-5.

УДК 621.311.019

Ю.П. Матеснко, С.В. Казанський, А.С. Луїнін

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СТРУКТУРНИХ СХЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В УМОВАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Проведено порівняльний аналіз методів визначення надійності структурних схем електростанцій на стадії проектування. Розглянуто особливості оцінювання надійності структурних схем електростанцій з урахуванням функціонування ринку електричної енергії.

Мета дослідження: підвищення експлуатаційної надійності структурних схем електростанцій і зниження ймовірності невідпустки електричної енергії.

Методика реалізації: впровадження сучасних алгоритмів і програм оцінювання надійності структурних схем.

Результати дослідження: проаналізовано основні методи аналізу надійності структурних схем електростанцій, отримано чисельні значення інтегрального показника надійності залежно від кількості відмов у схемі.

Висновки: показано переваги застосування методу марковських випадкових процесів для аналізу надійності структурних схем електростанцій, як на етапі проектування, так і в умовах експлуатації або реконструкції.

Ключові слова: електростанція, структурна схема, надійність, методи аналізу.

Надійшла 25.05.2015

Received 25.05.2015

ПОБУДОВА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТОРФУ В ПАРОВИХ СУШАРКАХ В ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ РЕЖИМАХ

В статті розглянуто основні особливості побудови енергоефективної системи управління процесом сушіння торфу. Визначено значення оптимальних керуючих параметрів процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках для певних значень збурюючих впливів, що дозволяють отримати сушенку необхідної якості за мінімальної затрати енергії. Система управління, в якій для певних значень збурюючих впливів визначаються оптимальні значення керуючих впливів, реалізована в моделі нейронної мережі. Для представницького навчання мережі проведено генерування випадкових чисел збурюючих впливів та знаходження оптимальних значень керуючих параметрів за згенерованих впливів на процес. Знайдено оптимальну структуру, алгоритм навчання та функції активації нейронної мережі типу перцептрон.

Ключові слова: парова трубчаста сушка, режимна карта, нейронна мережа, модель, навчання.

Вступ. Для якісного сушіння торфу ще в 70-их роках минулого століття були розроблені режимні карти процесу сушіння. Особливістю розроблених карт було те, що під час роботи сушарної установки при встановленні відповідних керуючих параметрів у залежності від характеристик торфу, що надходять на торфобрикетний завод, досягається лише необхідна вологість та температура сушенки, проте витрати енергоресурсів на сушіння не є мінімальними [1]. Ефективний алгоритм управління процесом сушіння торфу дозволить оператору сушарки полегшити завдання отримання сушенки необхідної якості, підвищити пожегобезпечність процесу і раціонально використовувати енергоресурси. Для побудови системи управління процесом сушіння торфу найбільш доцільно використовувати багатосаровий перцептрон як модель з можливостями екстраполяції, побудови функції будь-якої складності, в меншій мірі чутливої до збільшення числа вхідних впливів, що особливо важливо для побудови моделі багатофакторного об'єкта.

Мета роботи – розробити систему визначення режимів роботи сушарки, що застосовуються для торфу певних фізико-механічних властивостей, що дозволили б отримати сушенки необхідних якісних характеристик за мінімальної затрати енергії на процес сушіння за допомогою нейронних мереж.

Матеріали і результати дослідження. Для побудови математичної моделі процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках необхідно здійснити аналіз ступеню взаємозв'язку між вхідними параметрами – збурюючими та керуючими впливами, що об'єктивно впливають на процес сушіння торфу в парових сушарках торфу, і вихідними техніко-економічними показниками, визначеними за допомогою експертного оцінювання (табл. 1) [2]. Для цього було здійснено планування та проведено активні виробничі експерименти та подальші кореляційний і статистичний аналіз результатів дослідів процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках. В умовах торфобрикетного заводу “Сойне” план виробничих експериментів включає 14 дослідів за різних значень керуючих впливів. Оскільки згідно з планом проведення експериментів керуючі впливи приймали в серії дослідів екстремальні можливі значення для сушіння торфу певних фізико-механічних властивостей, а проведення однієї серії дослідів тривало понад 2 години, то в умовах виробництва проводити 28, 42, 56 і т.д. серій дослідів згідно плану виробничого експерименту не є можливим, оскільки це може призвести до отримання великої партії неякісних брикетів або виникнення аварійних ситуацій.

Таблиця 1 – Сукупність факторів, що характеризують процес сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці

Керуючі впливи	Збурюючі впливи	Керуючі параметри
завантаження сушарки, X_1	вологість торфу, F_1	вологість сушенки, Y_1
частота обертання барабана сушарки, X_2	насипна щільність, F_2	вологорізниця сушенки, Y_2
температура пари, X_3	зольність торфу, F_3	температура сушенки, Y_3
-	температура торфу, F_4	теплоспоживання, Y_4
-	температура повітря, F_5	температура вхідних газів, Y_5

Продовження Таблиці 1

Керуючі впливи	Збурюючі впливи	Керуючі параметри
-	сипучість торфу, F_6	електроспоживання, Y_6
-	фракційний склад торфу, F_7	-
-	вологорізниця торфу, F_8	-

За допомогою методу групового урахування аргументів (МГУА) була побудована цільова функція електроспоживання процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках [3].

$$Y_6 = -315,781 - 0,2288F_1 + 0,0193F_2 + 1,004F_7 - 0,0624F_8 + 0,4966X_1 + 0,7834X_2 + 11,4723X_4 \rightarrow \min \quad (1)$$

з обмеженнями за якістю сушенки, пожежобезпекою, а фактичне значення витрат теплової енергії повинно бути в межах мінімального та максимального значення:

$$0,6146F_1 - 0,4517F_3 + 0,6422F_4 + 0,4832F_5 - 0,2333F_6 - 10,26F_7 + 1,186F_8 + 1,57X_1 - 1,693X_2 \leq 20; \quad (Y_1)$$

$$64,21 + 1,571F_1 - 0,1532F_2 - 2,137F_4 - 3,06F_7 + 17,09F_8 + 1,084F_{12} + 1,124X_1 + 1,679X_2 + 2,356X_4 \leq 6; \quad (Y_2)$$

$$30 \leq 608,2 + 1,235F_1 - 0,1552F_2 + 2,823F_5 - 4,354F_7 - 59,09F_8 + 7,84X_1 - 13,29X_4 \leq 80; \quad (Y_3)$$

$$-1,148F_1 - 0,1294F_2 + 1,961F_4 - 1,502F_5 + 1,074F_6 + 1,78F_8 - 1,782X_2 + 0,4177X_3 \leq 120; \quad (Y_5)$$

$$Q_{\min} \leq -3,64,4F_4 - 1,022F_6 + 4,107X_1 - 1,05X_3 + 24,17X_4 \leq Q_{\max}; \quad (Y_4)$$

Використовуючи симплекс метод, проведено мінімізацію даної функції та знайдено значення X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , що задовольняють умовам мінімуму споживання електричної енергії для отримання сушенки необхідної якості, оптимальному споживанню теплової енергії та умовам пожежобезпеки за певних значень збурюючих впливів $F_1 \dots F_8$.

Для побудови системи управління процесом сушіння торфу доцільно застосувати багат шаровий перцептрон. Навчений на експериментальних дослідах перцептрон дозволяє реалізувати розв'язання задачі «вхід-вихід», тобто при надходженні нових значень збурюючих впливів він дозволяє прорахувати оптимальні керуючі впливи.

Для вирішення завдань за допомогою нейронних мереж необхідно зібрати достатній і представницький обсяг даних для того, щоб навчити нейронну мережу їх вирішенню. Відомий ряд евристичних правил, що погоджує число необхідних спостережень з розмірами мережі (найпростіше з них свідчить, що число спостережень має бути в десять разів більше числа зв'язків у мережі). Зі зростанням кількості змінних кількість необхідних спостережень зростає нелінійно. Для багатьох реальних задач трапляються випадки, коли необхідні кілька сотень або тисяч спостережень. Якщо даних менше, то інформації для навчання мережі буде недостатньо.

Тому високу якість моделі можна отримати лише при більш тривалому навчанні, з якомога більшим набором даних. В ході проведення виробничих експериментів було отримано 14 спостережень, що для вирішення задачі інтерполяції і регресії за допомогою нейронних мереж вкрай мало. Тому виникає завдання збільшення числа набору даних вхідних і вихідних параметрів. Для цього необхідно провести генерацію випадкових наборів вхідних параметрів (у даному випадку збурюючих впливів процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках). Генерація чисел повинна проводитися за певними функціональними залежностями збурюючих впливів між собою, які вказані в таблиці кореляційного аналізу. З цією метою необхідно провести генерацію випадкових чисел з заданим розподілом, використовуючи метод Монте Карло, який є найбільш зручним для моделювання випадкових і ймовірнісних процесів [4]. Часто на практиці зустрічаються системи випадкових величин, тобто такі дві (і більше) різні випадкові величини X , Y (та інші), які залежать одна від одної. Згідно проведеного кореляційного аналізу результатів експерименту, існують фізико-механічні властивості торфу, що тісно пов'язані, і в яких значення коефіцієнту кореляції більше ніж $+0,5$. Як показали розрахунки коефіцієнтів кореляцій, існує тісний зв'язок тільки між факторами F_2 та F_6 , F_3 та F_5 , F_3 та F_8 , F_7 та F_4 .

За допомогою алгоритму пошуку випадкових величин для двох факторів [5] було проведено генерацію 86 спостережень, що в сумі з 14 отриманими в ході проведення виробничих експериментів дала набір даних із 100 входів і 100 виходів для побудови нейронної мережі.

Для подальшого дослідження необхідно вибрати і сформулювати процедуру навчання нейронних мереж.

Серед алгоритмів навчання методу зворотного поширення слід віддати перевагу, коли обсяг даних великий, і серед них можуть надлишкові. Завдяки тому, що в методі зворотного поширення коригування помилки відбувається по окремих випадках, надмірність даних не шкодить. Методи ж Левенберга-Маркара і спряжених градієнтів проводять обчислення на всьому наборі даних, тому при збільшенні числа спостережень тривалість однієї епохи сильно зростає, але при цьому не обов'язково поліпшується результат, досягнутий на цій епосі [6].

Крім того, зворотне поширення не поступається іншим методам в ситуаціях, коли даних мало, оскільки в цьому випадку недостатньо даних для прийняття дуже точного рішення (більш тонкий алгоритм може дати меншу помилку навчання).

Отже, для вирішення задачі знаходження оптимальних керуючих параметрів за певних збурюючих впливів процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках необхідно побудувати та здійснити навчання (тренування) перцептрона методом зворотного поширення, а функціями активації (ф.а.) можуть бути логістична, гіперболічний тангенс та тотожна функція. Тобто вхідними векторами нейронної мережі є значення восьми збурюючих впливів ($F_{1i}, F_{2i}, F_{3i}, F_{4i}, F_{5i}, F_{6i}, F_{7i}, F_{8i}$), а виходами – енергозберігаючі значення керуючих впливів ($X_{1i}^*, X_{2i}^*, X_{3i}^*$), де i – порядковий номер значень впливів.

У навчальну підвибірку даних слід включити обов'язково набір даних, отриманих із виробничих експериментів, як таких, що найкраще описують математичну модель процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках. В тестову і контрольну вийдуть дані отримані після генерування випадкових величин.

Для знаходження оптимальної структури нейромережі – необхідної кількості прихованих нейронів, функції активації прихованих та вихідних нейронів за допомогою автоматизованої стратегії для створення моделі нейронної мережі пакету Statistica Neural Network було проведено тренування сукупності моделей, що реалізують поставлену задачу знаходження оптимальних керуючих параметрів.

Для подальшого аналізу нейронних мереж було здійснено вибір трьох кращих моделей з найменшим значенням середньоквадратичної похибки (RMS) на контрольній вибірці (табл. 2). За діаграмою залишків можна простежити кількість наборів даних на тренувальній вибірці, виходи яких не відповідають цільовим значенням, взятим із моделі з певними відхиленнями за абсолютними значеннями. Мережі, що на тренувальній вибірці мають найбільшу кількість викидів значень параметру виходу від нульових значень, є найменш підходящими для вирішення задачі знаходження оптимальних керуючих факторів процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках. В мережі MLP 8-5-3 (MLP – багатосаровий перцептрон, що має 8 входів, 5 – внутрішніх шарів та три виходи) є 7 тренувальних вибірок, що мають відхилення параметра X_1 більше за 0,1 за абсолютним значенням від оптимального, в MLP 8-12-3 та MLP 8-11-3 – по одній такій вибірці. Для параметра X_2 в мережі MLP 8-5-3 спостерігаються 7 тренувальних вибірок, що відрізняються на 1,0 за абсолютним значенням від оптимального, в MLP 8-12-3 таких вибірок не було, а в MLP 8-11-3 – лише одна. Для параметра X_4 в мережі MLP 8-5-3 за результатами її навчання є 8 вибірок, що мають відхилення більше 0,05 за абсолютним значенням від оптимального, в MLP 8-12-3 таких вибірок немає, а в MLP 8-11-3 тільки дві. Для нейронних мереж згідно з табл. 2 найкращу продуктивність навчальної та тестової вибірки має мережа MLP 8-12-3, на контрольній – MLP 8-5-3, похибки на навчальній та тестовій вибірці даних найменші в мережі MLP 8-12-3, на контрольній – в MLP 8-11-3. Кожна із аналізованих мереж має певні переваги.

Таблиця 2 – Результати побудови найкращих нейромереж для знаходження оптимальних параметрів X_2, X_3, X_4 при значенні керуючого впливу $X_1=3,5$ в пакеті програми Statistica Neural Network

№	Мережа	Тренув. помилка	Тестова помилка	Контрол. помилка	Ф.а. прихов. шару	Вихідна ф.а.
1	MLP 8-5-3	0,428	0,0892	0,8697	Logistic	Exponential
2	MLP 8-12-3	0,02	0,002	0,674	Logistic	Logistic
3	MLP 8-11-3	0,034	0,01	0,2495	Tanh	Exponential

Оскільки мережа MLP 8-12-3 має найменшу кількість «викидів», тобто кількості вибірок, що мають значні відхилення від цільових значень виходів мережі, та в загальному найкращі продуктивності та похибки вибірок, то для вирішення задачі знаходження параметрів X_1, X_2, X_3 найбільш доцільна саме дана мережа.

Висновки.

1. Сформульовано основні вимоги для побудови нейронних мереж, що визначають оптимальні енергоефективні керуючі впливи в залежності від значень збурюючих впливів процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках – значна кількість наборів даних входу та виходу мережі та навчання мережі за допомогою алгоритму зворотного поширення.

2. Побудовано нейронні мережі з найменшою середньоквадратичною похибкою відтворення на контрольній вибірці із яких за допомогою залишків можна простежити кількість наборів даних на тренувальній вибірці нейронної мережі, виходи яких не відповідають цільовим значенням моделі з певними відхиленнями за абсолютними значеннями та продуктивності і процентному значенні похибки відтворення на тренувальній, контрольній, тестовій вибірці.

Список літератури.

1. Гнеушев В.О. Брикетування торфу: Монографія. – Рівне: НУВГП, 2010. – 167 с.

2. Кулаковський Л. Я. Формування факторного поля для експериментальних досліджень парової трубчатої сушарки торфу/ Л. Я. Кулаковський, С.І. Алтухов// Вісник НТУУ “КПІ”, серія “Гірництво”, 2014, вип. 1. – С. 34 – 41.

3. Кулаковський Л.Я. Знаходження за допомогою МГУА математичної моделі процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках [Текст]/ Л.Я. Кулаковський, В.П. Розен// Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об’єктів. Збірник наукових праць І Міжнародної науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів: 17-18 жовтня 2013 р., м. Донецьк: «ДВНЗ» ДонНТУ, 2013. – С. 131-134

4. Соболев И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев / М.: Наука, 1968.– 64 с.

5. Войтишек А.В. Основы методов Монте-Карло в алгоритмах и задачах. Часть V/ А.В. Войтишек// Новосибирск, изд-во НГУ, 1999. – 76 с.

6. Заенцев И.С. Нейронные сети: основные модели. Учебное пособие/ И.С. Заенцев// Воронежский государственный университет, 1999. – 98 с.

V.P. Rosen, L Ya. Kulakovskiy

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

CONSTRUCTION OF NEURAL NETWORK MODEL OF PEAT DRYING IN STEAM DRYING IN ENERGY-SAVING REGIMES

The article reviews the main features of energy efficient operation of peat’s drying process. The optimal control parameters of drying peat steam tube dryers for certain values of perturbations that can get drying peat of required quality at the lowest cost energy It was determined. The operation system in which for certain values of perturbation influences can be determined the optimal values of control actions was implemented in the neural network model. It was necessary to generate random amount of perturbations and find the optimal values of control parameters for generated effects in the process for a good network training. It was found optimal structure, learning algorithm and activation function of neural network for model of drying process in peat tube steam dryer.

Key words: steam tube dryers, regimes map, neural network, model, training.

References

1. Hnyeushev V.O. Briquetting peat Monograph. – Rivne: NUWMNRU, 2010. – 167 p.
2. Kulakovskiy L.Ya. Formation factor field for experimental researches in tube steam peat dryer / L.Ya. Kulakovskiy, E.I. Altuhov // Visnyk NTUU “KPI”, “Mining” series, 2014, issue 1. – p.34 - 41.
3. Kulakovskiy L.Ya. Finding GMDH using a mathematical model of drying peat steam tube dryer [Text] / L.Ya. Kulakovskiy, V.P. Rosen // Current problems of power supply systems of industrial and domestic objects. Scientific Papers and International scientific conference of teachers, students and PhD students: 17-18 October 2013, Donetsk, "State University" National Technical University, 2013. – p. 131 - 134.
4. Sobol I.M. Monte Carlo’s method / I.M. Sobol / M.: Nauka, 1968. – 64 p.
5. Voytyshchek A.V. Basics of Monte Carlo methods in algorithms and problems. Part V / A.V. Voytyshchek// Novosibirsk, NSU Publishing House, 1999. – 76 p.
6. Zaentsev I.S. Neural networks: basic models. Textbook / I.S. Zaentsev // Voronezh State University, 1999. – 98 p.

УДК 621.311.1:621.9.263:681.51/54

В. П. Розен, д-р техн. наук, проф., Л. Я. Кулаковський, аспірант

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СУШКИ ТОРФА В
ПАРОВЫХ СУШИЛКАХ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМАХ**

В статье рассмотрены основные особенности построения энергоэффективной системы управления процессом сушки торфа. Определены значения оптимальных управляющих параметров процесса сушки торфа в паровых трубчатых сушилках при определенных значениях возмущающих воздействий, позволяющие получить сушенку необходимого качества при минимальных затратах энергии. Система управления, в которой для определенных значений возмущающих воздействий определяются оптимальные значения управляющих воздействий, реализована в модели нейронной сети. Для хорошего обучения сети было проведено генерирование случайных чисел возмущающих воздействий и нахождение оптимальных значений управляющих параметров при сгенерированных значениях возмущающих воздействий. Была найдена оптимальная структура, алгоритм обучения и функции активации нейронной сети типа перцептрон.

Ключевые слова: паровая трубчатая сушка, режимная карта, нейронная сеть, модель, обучение.

Надійшла 03.10.2015

Received 03.10.2015

І.Г. Яковлєва, д-р техн. наук, професор, А.С. Мних, канд. техн. наук, доцент
Запорізька державна інженерна академія

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ТВЕРДОГО ПАЛИВА У ШАРІ БОКСИТОВОЇ ШИХТИ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ СПІКАННЯ

В роботі проведений аналіз поточного стану питання моделювання агломераційного процесу й представлені результати моделювання спікання бокситової шихти на розробленій автором скінченно-елементній тепловій моделі.

Досліджено час вигорання частинки твердого палива для умов технологічного процесу, що розглядається. Зроблено розрахунок раціонального розподілу коксової дрібноти, як по висоті, так і по ширині палети агломашини, з урахуванням акумуляції теплоти вищележачими шарами агломерату, тим самим забезпечивши вирівнювання значень максимальної температури зони горіння по висоті спеку.

Проведені дослідження дозволили встановити нерівномірний характер розподілу задаваної потужності, що виділяється в одиничному об'ємі, як по ширині, так і по висоті пірогу, який має суттєве збільшення у прибортових зонах й поступове зменшення від верхніх к нижнім горизонтам спеку.

Результати моделювання дозволили зробити висновок, щодо можливості зниження вмісту палива в шихті при умові дотримання необхідної концентрації коксової дрібноти по горизонтам, що можливо при підсиленні сегрегації класів крупності матеріалу, що завантажується по висоті шару.

Ключові слова: сегрегація, імітаційна модель, метод скінчених елементів, тепловий режим, горизонт шару, шихта.

Вступ

На даний час всі агломераційні фабрики стикаються з проблемою постійного подорожчання енергоресурсів на фоні необхідності зниження або збереження на поточному рівні собівартості виробленої продукції. Це стосується і процесу агломерації бокситів, де основним енергоносієм виступає коксовий дріб'язок, скорочення обсягів споживання якого є вкрай актуальним питанням, з урахуванням збереження якості агломерату за фізико-хімічними показниками.

Для підвищення енергоефективності агломераційного процесу необхідні подальші дослідження питань завантаження матеріалу, розподілу хімічних компонентів і палива по висоті шару, а також теплових процесів, що протікають в шарі бокситової шихти, що спікається.

При дослідженні процесів, що протікають в ході здійснення даних операцій, широко використовується математичне моделювання, проте далеко не всі відомі моделі є достатньо точними, адекватними і зручними для проведення досліджень, спрямованих на оптимізацію теплового режиму розглянутого процесу.

Таким чином, розробка адекватної теплової моделі процесу агломерації бокситів для розв'язання завдань оптимізації режиму спікання, є актуальною науковою і практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням дослідження та моделювання теплових процесів в агломераційному виробництві присвячені роботи Є. Ф. Вегмана [1], А. А. Сігова [2] та ін., в яких при розробці моделі використовувався метод елементарних теплових балансів.

Застосування даного методу передбачає складання для кожного елементарного шару системи рівнянь з подальшим їх розв'язанням, однак тенденція до збільшення висоти матеріалу, що спікається обумовлює наявність великої кількості елементарних шарів, що призводить до необхідності розв'язання десятків систем рівнянь, тим самим ускладнюючи практичне застосування методу елементарних теплових балансів.

В роботі [3] представлений розгорнутий аналіз сучасних підходів до моделювання, що базуються на застосуванні спеціального програмного забезпечення для реалізації числових та імітаційних моделей агломераційного процесу.

Так в [4], математична модель являє собою залежність $Y = f(U, V, Z)$: U – вектор керуючих впливів; V – вектор контрольованих збурень; Z – вектор неконтрольованих збурень; Y – вихідний вектор об'єкта. Вид даної функції при описі процесу спікання залежить від часу і має суттєві обмеження

на змінні. При описі функціонування системи зі складною внутрішньою структурою, аналітичний опис, запропонований Цаплиним А.І., стає практично неможливим при забезпеченні достатньої точності моделі.

Модель, запропонована Калашниковим С. Н. [5], базується на методах формально-математичного опису фізико-хімічних явищ і реалізації обчислювального експерименту. Автором вказана необхідність створення гнучких і універсальних технологій математичного моделювання, що дозволяють вирішувати різні наукові та практичні завдання.

В роботі [6] представлена комплексна математична модель, що відповідає вимогам адекватності реальних теплофізичних та фізико-хімічних процесів, що протікають в шарі при випалюванні залізородних окатишів. Розроблена модель розглядає випалювальний агрегат в цілому і зачіпає лише деякі особливості процесу спікання. Використання даної моделі доцільно лише для розв'язання технологічних задач.

Математичні моделі в роботах [7,8] побудовані за блоковим принципом. Всі розглянуті процеси згруповані в підсистеми і базуються на методах статичної термодинаміки. Запропонована структурна схема процесу спікання побудована на основі загальної схеми технологічного об'єкта дослідження і є найбільш повною з усіх існуючих. Наведена блокова схема моделі не дозволяє поєднати результати розрахунків підмоделей, тим самим ускладнюючи перевірку її адекватності.

Варто додати, що до істотного недоліку наведених моделей відноситься відсутність аналізу сегрегаційних процесів, що протікають в завантаженому матеріалі, що обумовлює закономірність розподілу палива та хімічних компонентів по висоті шару шихти.

У роботах [9, 10] представлена модель, що базується на методі скінчених елементів, що дозволяє визначити раціональний розподіл компонентів шихти та твердого палива по висоті і ширині палети агломашини, тим самим, стабілізувати тепловий режим процесу спікання залізородної шихти. Наведена модель перевірена на адекватність, помилка моделювання не перевищує 12,6%, та досить просто може бути модифікована для умов спікання на аглоленті з іншими технічними характеристиками та технологічними особливостями.

Мета роботи і постановка задачі

Метою даної роботи є проведення досліджень з моделювання теплового режиму процесу агломерації бокситової шихти з ціллю визначення раціонального розподілу твердого палива, що обумовлює стабілізацію температури зони горіння по висоті шару.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- модифікувати розроблену автором [10] модель процесу спікання агломераційної шихти для умов спікання бокситів;
- отримати математичні залежності коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності бокситової шихти;
- провести моделювання процесу спікання з метою визначення умов, які забезпечують сталість максимальної температури зони горіння;
- визначити раціональний, для даного процесу, розподіл твердого палива по висоті шару.

Результати дослідження

Математичну модель теплового режиму процесу спікання бокситової шихти, реалізуємо на базі, раніше отриманої автором, перевіреної на адекватність [11] моделі, заснованої на методі скінчених елементів (МСЕ).

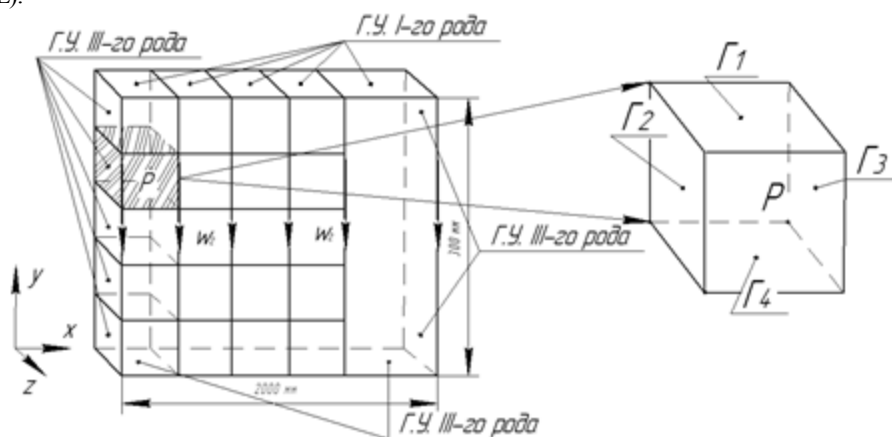


Рисунок 1 – Розрахункова схема шару шихти підготовленої до термічної обробки

Для побудови розрахункової області з урахуванням граничних умов використовуємо схему, представлену в [10], рис. 1. Таким чином, маємо вертикальний зріз шару бокситової шихти, підготовленої до спікання 2000x300x100 мм, який, в свою чергу, розбитий на одиничні об'єми [9].

Спеціалізоване програмне забезпечення ANSYS (Mechanical APDL), що використовується для моделювання процесу, яке базується на методі МСЕ, розіб'є кожен з вищевказаних одиничних об'ємів на скінченні елементи (СЕ). Для розв'язання об'ємної теплової задачі використаний вісьмивузловий тривимірний скінченний елемент, що має один ступінь свободи - температура (TEMP). Це дозволяє СЕ приймати навантаження у вигляді теплового потоку. Рішенням задачі є безліч вузлових даних, що складаються з температури по всьому об'єму досліджуваного шару.

Таким чином, при використанні зазначеного СЕ в розрахунковій області побудована сітка з 428 тисяч СЕ тетрадральної форми, рис. 2.

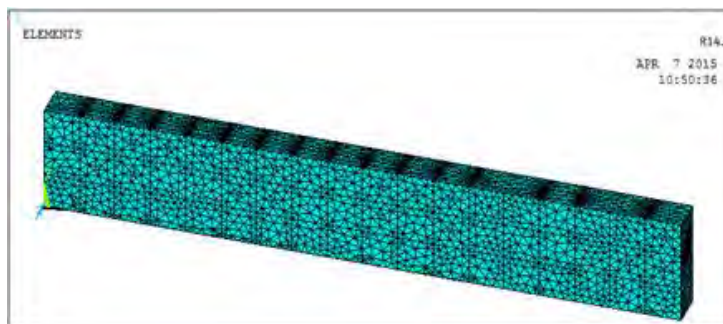


Рисунок 2 – Розрахункова область моделі з скінчено-елементною сіткою.

Для здійснення розрахунків вказані властивості матеріалу, такі як щільність, коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і т.п. Щільність бокситів, залежно від марки коливається в діапазоні 1200-1600 кг/м³ [12].

Коефіцієнт лінійного температурного розширення бокситів в інтервалі температур 0-1200°C становить $1,0 \times 10^{-5}, \text{K}^{-1}$. Середня теплоємність бокситу в інтервалі температур 20-1000°C може бути розрахована за наступною формулою [12]:

$$c_p(T) = 0,85 + 0,000285T - 0,00000212T^{-2}, \text{ кДж/(кг К)}.$$

Коефіцієнт теплопровідності бокситу в великій мірі залежить від його щільності і вологості та в діапазоні температур 278-288 К може бути обчислений за формулою [12]:

$$\lambda(T) = aW^2 + b, \text{ Вт/(м К)};$$

де W - вологість бокситу,%; значення коефіцієнтів a, b представлені в табл. 1.

Таблиця 1 - Значення коефіцієнтів для розрахунку коефіцієнту теплопровідності

Щільність, кг/м ³	1200	1300	1400	1500	1579
a, Вт/м К	0,0007	0,001	0,0015	0,00263	0,0037
b, Вт/м К	0,26	0,3	0,34	0,39	0,45

Граничні умови, що накладаються на розрахункову область моделі являють собою Г.У. I-го та III-го роду [9].

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q(x, y, z), \quad (1)$$

$$\text{Н.У.: } t_0 = 0; T_i(x, y, z) = T_0,$$

$$\text{Г.У.: } y = y_0; T_i|_{\Gamma_1} = T_{\text{запал}}, t > 0,$$

$$x = x_0; -\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}|_{\Gamma_2} = k_1(T(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$x = x_n; -\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}|_{\Gamma_3} = k_2(T(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$y = y_n; -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\Gamma_4} = k_3 (T(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$z_0 = z_n = 1.$$

де T_i - температура в скінченному об'ємі, °С; $T_{o.c.}$ - температура навколишнього середовища, °С; $T_{запал}$ - температура запалювання, °С; k - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²°С); λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м°С); ρ - щільність матеріалу, кг/м³; c - питома теплоємність Дж/(кг°С); q - потужність внутрішніх джерел Вт/м³; t - час, с.

Потужність внутрішніх джерел енергії, що обумовлює згоряння частинок твердого палива та хімічних процесів в шарі шихти, що спікається вибирали методом підбору (проб), з метою забезпечення сталості максимальної температури зони горіння, на основі досліджень проведених у [13], та розрахованою за формулою:

$$q = \frac{Qm\varepsilon}{V\rho\Delta t};$$

де: Q - теплота, що виділяється в одиничному елементі, встановлюється з теплового балансу, кДж; m - маса одиничного елемента, кг; V - об'єм одиничного елемента, м³; ρ - щільність матеріалу, кг/м³; Δt - час спікання, с.

Результати моделювання теплового режиму спікання бокситової шихти представлено на рис. 3.

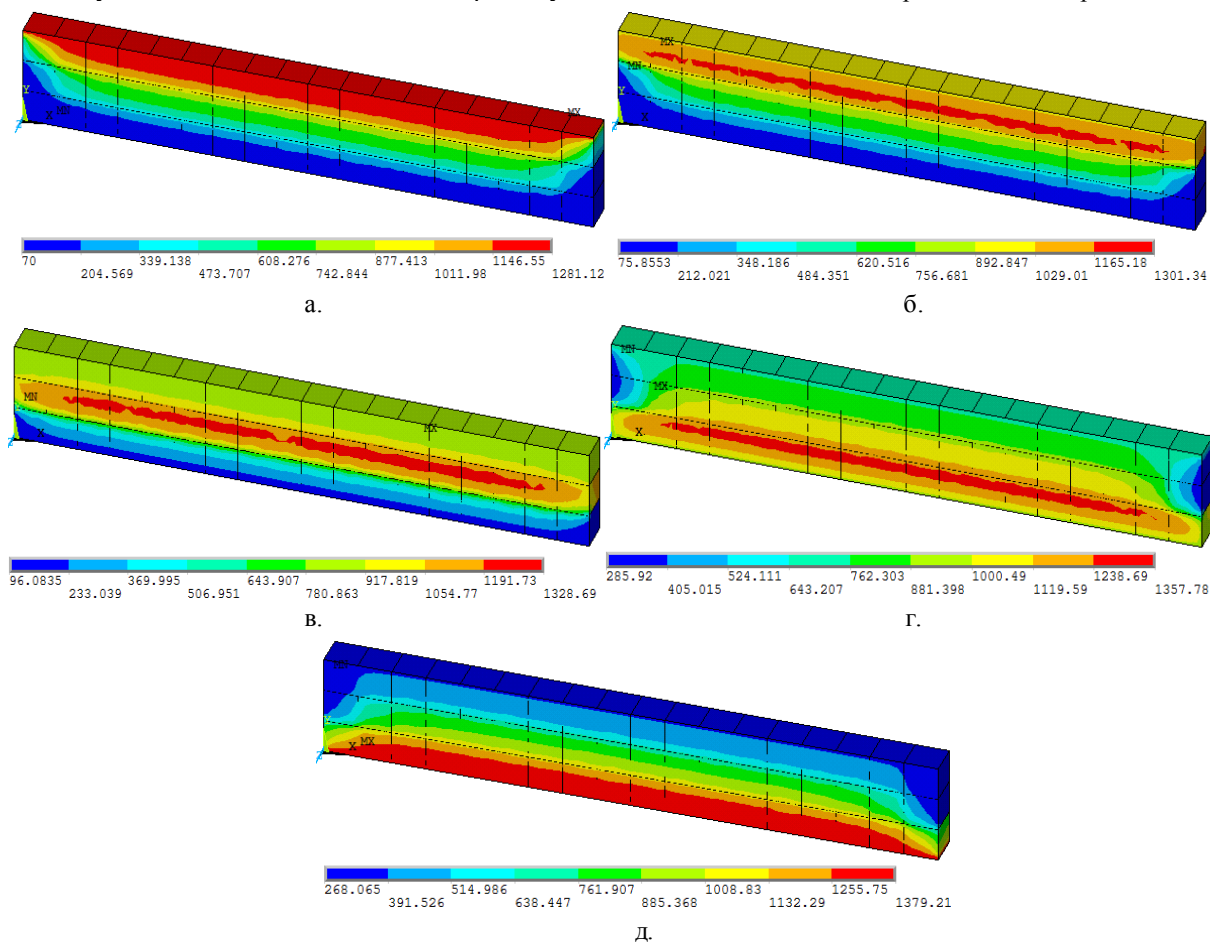


Рисунок 3 – Розподіл температур по горизонтам шару шихти, що спікається: а - горизонт 1, б - горизонт 2, в - горизонт 3, г - горизонт 4, д - горизонт 5.

З представлено на рис. 2 розподілу температур видно, що за результатами моделювання досягнуто усунення, притаманної для даного процесу, нестачі теплоти у верхніх горизонтах шару і його надлишку, за рахунок акумуляції регенованої теплоти, у вищерозташованих шарах. Температура зони горіння у шарі бокситового агломерату у виробничих умовах, за рахунок відсутності сегрегації шихти, і як наслідок,

рівномірного розподілу твердого палива, досягала 1450-1500 °С. Останнє неприйнятно у зв'язку з переоплавленням нижніх горизонтів шихти і передчасним руйнуванням колосників агломераційної машини.

Результати моделювання свідчать про стабілізацію температури зони горіння в діапазоні 1290-1380 °С, що покликане виключити переоплавлення нижніх горизонтів і недопик верхніх шарів шихти, що спікається, і тим самим підвищити вихід годного. Проведені дослідження дозволили встановити нерівномірний характер розподілу заданої потужності, що виділяється в одиничному об'ємі, як по ширині, так і по висоті пирога, який має суттєве збільшення в прибортових зонах і поступове зниження від верхніх до нижніх горизонтів спеку. Останнє свідчить про значні втрати теплоти через стінки палети з газами через нещільність і підвищену порозність шару шихти, в першому випадку, і про істотний рівень акумуляції теплової енергії, у другому.

Таким чином, отримавши необхідний розподіл температур по горизонтах і знаючи потужність внутрішніх джерел в кожному елементарному об'ємі шару, можна вирішити завдання з визначення раціонального розподілу палива по висоті і ширині палети, з урахуванням теплових ефектів і акумуляції теплоти у спеку. Так як потужність внутрішніх джерел енергії задається в кВт, знайдемо кількість теплоти, що виділяється в елементарному об'ємі шару. Для цього необхідно встановити час, протягом якого у вказаному об'ємі відбувається горіння частинки палива.

Враховуючи, що час горіння частинки залежить від її розміру, проведені дослідження по встановленню середнього діаметра частинок палива, що подається в відділення, що спікає для умов «Запорізького абразивного комбінату». d_{cp} частинки твердого палива склав 1,86 мм.

Для визначення часу горіння частинки коксового дріб'язку відомого розміру, використані результати досліджень Карабасова Ю.С. [14], про вплив розміру часток різних сортів твердого палива на час їх вигорання, які дали можливість встановити час вигорання зерен коксового дріб'язку для умов аглофабрики підприємства в діапазоні 42-46 с.

Враховуючи, що досягнення необхідної температури зони горіння в кожному елементарному шарі відбувається не тільки за рахунок теплоти, що виділяється при горінні твердого палива, але і завдяки екзотермічним реакціям і акумуляції теплоти вищерозташованими горизонтами, на базі результатів отриманих в [13], встановлено процентне співвідношення теплоти, яке вноситься кожною складовою у загальний прихід тепла у розглянутий одиничний об'єм по висоті шару шихти. Встановлено, що сумарна теплота екзотермічних реакцій, теплота, що вноситься повітрям і шихтою, враховуючи коефіцієнт акумуляції теплової енергії $\theta = (0,01 \div 0,5)$, змінюється в широкому діапазоні 7-36% за висотою шару. Виключивши цю складову з загальної витрати теплоти в одиничному об'ємі шару, що спікається можна визначити вміст твердого палива в кожному з розрахункових об'ємів. Для цього скористаємося формулою:

$$c_{ш} = \frac{q_c}{a_{co}q_{co} + a_{co2}q_{co2}} ;$$

де $c_{ш}$ - вміст твердого палива в шихті, кг; $a_{co}a_{co2}$ - частка вуглецю, що згорає до CO і CO_2 , %; q_c - теплота згорання коксиду, кДж/кг; $q_{co}q_{co2}$ - теплота згорання вуглецю до CO і CO_2 відповідно, кДж/кг.

Процентний вміст вуглецю по висоті і ширині шару визначимо з формули:

$$c_{\%} = \frac{c_{ш} \cdot 100\%}{V \rho_{ш} (1 - \varepsilon)} ;$$

де V - об'єм елементарного об'єму (скінченного елемента), м³; $\rho_{ш}$ - щільність шихти, кг/м³; ε - порозність шару, %.

Таким чином, раціональний розподіл твердого палива по висоті і ширині палети, що забезпечує сталість максимальної температури в зоні горіння, представлено на рис.4.

Сумарний вміст палива в шихті за результатами розрахунків склав 5,582%.

Існуючий на комбінаті і раціональний розподіл палива по горизонтах шару при використанні барабанного живильника представлено на рис. 5.

З рис.5 видно, що існуюча схема завантаження бокситової шихти на палети агломашини не забезпечує необхідного розподілу твердого палива по висоті шару.

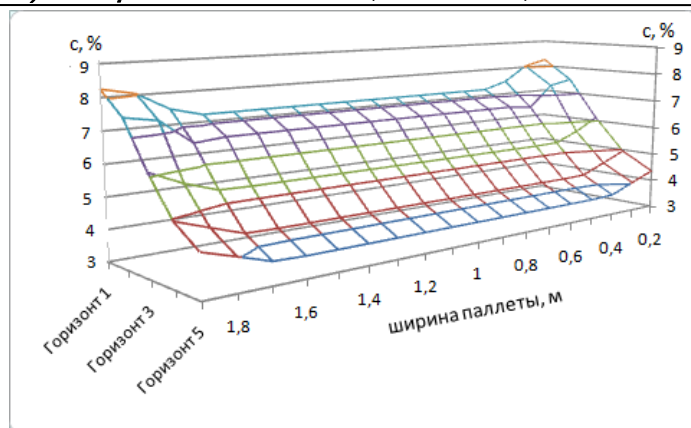


Рисунок 4 – Раціональний розподіл твердого палива по висоті і ширині палети.

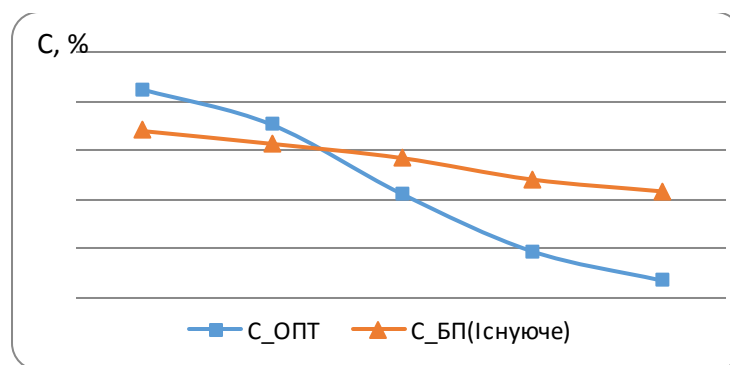


Рисунок 5 – Існуючий і раціональний розподіл палива по горизонтах.

Висновки

В роботі реалізована теплова модель процесу агломерації бокситів, яка розроблена на базі методу скінченних елементів. Проведені дослідження агломерації бокситів дозволили встановити нерівномірний характер розподілу потужності внутрішніх джерел, що виділяється в одиничному об'ємі, як по ширині, так і по висоті палети.

Представлені результати моделювання, свідчать про можливість стабілізації температури зони горіння в діапазоні 1290-1380°C, що дозволить виключити переоплавлення нижніх горизонтів й недопалання верхніх шарів шихти, що спікається, й тим самим підвищити вихід годного.

Отримані в роботі залежності, характеризують раціональний розподіл коксової дрібноти, в результаті чого, в верхній частині шару буде зосереджена потрібна кількість дрібних фракцій, які є основними носіями твердого палива, тим самим компенсуючи дефіцит теплоти в цих горизонтах. У свою чергу, зниження концентрації палива в нижніх горизонтах, за рахунок концентрації там крупних фракцій, усуне переоплавлення агломерату.

Система завантаження, що використовується для умов даного виробництва, у вигляді барабанного живильника, не забезпечує потрібного розподілу твердого палива по висоті шару, тим самим роблячи актуальним питання вибору типу та розрахунку характеристик завантажувального пристрою агломації, з метою забезпечення максимально близького до розрахованого розподілу палива у підготовленій до спікання бокситовій шихті.

Список Літератури

1. Вегман, Е. Ф. Процесс агломерации [Текст] / Е. Ф. Вегман. – М.: Metallurgiya, 1963. – 153 с.
2. Сигов, А. А. Агломерационный процесс [Текст] / А. А. Сигов, В. А. Шуржал – Киев.: Техника, 1969. – 232 с.
3. Савельев, С. Г. Математическое моделирование в исследовании процессов производства окискованного сырья. [Текст] / С. Г. Савельев, Я. А. Стойкова // Вісник КрНУ (збірник наукових праць). – 2012. - №34 – С. 44-47.
4. Цаплин, А. И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии [Текст] / А. И. Цаплин, И. Л. Никулин – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. – 203 с.

5. Калашников, С. Н. Математическое моделирование тепло-массообменных процессов в металлургических агрегатах на основе объектно-ориентированной технологии [Текст]: дисс. ... д. т. н. / С. Н. Калашников – Новокузнецк, 2002. – 278с.
6. Боковиков, Б. А. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата. [Текст]/ Б. А. Боковиков, В. В. Брагин, В. М. Малкин и др. // Сталь. – 2010. - №9. – С. 84-87.
7. Фролов, Ю. А. Теплотехническое исследование процесса агломерации и совершенствование технологии и техники для производства агломерата [Текст] : автореф. дисс. ... д. т. н. / Ю. А. Фролов – Екатеринбург, 2005. – 49с.
8. Елисеев, А. А. Исследование тепло-массообменных процессов при агломерации шихты [Текст]: дисс. канд. техн. наук / А. А. Елисеев - Череповец., 2006. – 165с.
9. Мных, А. С. Решение задачи распределения температуры в единичном объеме агломерационного слоя методом конечных элементов с учетом внутреннего источника тепла [Текст] / А. С. Мных // Збірник наукових праць ДДТУ. – 2014. – №2(25). – С 47-51.
10. Мных, А. С. Синтез трехмерной модели теплового режима процесса спекания агломерационной шихты [Текст] / А. С. Мных // Вісник КрНУ. – 2014. - №38 – С. 44-47.
11. Мных, А.С. Анализ адекватности конечно-элементной модели процесса агломерации железорудной шихты [Текст] / А. С. Мных, М. Ю. Пазюк. И. М. Мних // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. - №1 (21). – С. 22-25.
12. Бабошин, В. М., Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии. Справочник. [Текст] / В. М. Бабошин, Е. А. Кричевцов, Е. М. Абзалов и др.- М.: Металлургия, 1982. 152 с.
13. Мных, А.С. Исследование тепловых процессов в агломерируемом слое бокситов в зависимости от сегрегации топлива и химкомпонентов по высоте [Текст] / А. С. Мных // Енергетика. Енергосбережение. Енергоаудит. – 2015. - №6(136). – С. 23-27.
14. Карабасов, Ю. С. Использование топлива в агломерации [Текст]/ Ю. С. Карабасов, С.М. Валавин. - М.: Металлургия, 1976. – 264 с.

I.G. Yakovleva, A.S. Mnyh

Zaporozhe state engineering academy

THE APPLICATION OF MODEL OF BAUXITE CHARGE SINTERING THERMAL REGIME TO DETERMINE THE OPTIMUM DISTRIBUTION OF SOLID FUELS

The problem of constant energy price rising necessitates further researches about material loading and fuel and chemical component distribution along pallets, as well as thermal processes in the layer of sintered bauxite charge.

The analysis of current state of the sintering process modeling problem suggests the need for adequate thermal model of the bauxite agglomeration process for sintering process optimization tasks solving.

This paper contains results of bauxite charge sintering process modeling on finite element thermal model developed by author. Simulation results achieved to eliminate inherent to this process, lack of heat in the upper horizons of the layer and its excess, due to the accumulation of recovered heat in the lower layers.

Conducting researches revealed uneven character of transmitted power distribution, which is released per unit volume, both with weight and height of the cake, which has a substantial increase in areas near the edge and a gradual decrease from the upper to the lower horizons of the cake.

It was investigated combustion time of solid fuel particles for the conditions of considered process. Also was performed the calculation of optimal distribution of coke breeze, both with height and width of sinter pallets, with the accumulation of heat overlying agglomerate horizons. This ensures the alignment of the maximum temperature of the combustion zone in horizons of layer.

The simulation results led to the conclusion about the possibility of reducing the amount of fuel in the charge, subject to the required concentration of coke breeze in the horizon, which is possible in amplification of size fractions segregation of the feed material with height of pallets.

Conclusions. *In this paper was implemented the thermal model of bauxite agglomeration process, which was developed on the basis of the finite elements method. The research allowed to establish uneven distribution pattern of the transmitted power, which is released per unit volume, both with width and height of pallets.*

The presented simulation results indicate the possibility to stabilize the combustion zone temperature in the range of 1290-1380 °C, which is intended to avoid undermelting of lower layers and undersintering of upper layers of the charge, and thus increase the valid production.

Dependences, which were obtained in this paper, characterize an optimal distribution of coke breeze. As a result, the required amount of fine fractions (which are the main carrier of solid fuels) will be concentrated in the upper part of the layer. This will eliminate the lack of heat in these horizons. In turn, the reduction of fuel in the lower layers, due to the concentration of large fractions, eliminates the appermelting of agglomerate.

Charge loading system, which has form of a drum feeder, does not provide the required distribution of solid fuel in height of layer. This creates the prerequisites for choosing the type and characteristics of boot device of sintering machine, in order to ensure as close as possible to the estimated distribution of fuel in prepared to sintering bauxite charge.

Key words: segregation, imitation model, the finite elements method, thermal regime, horizon layer, charge.

References

1. Vegman E.F. Process aglomeracii // Moscow: Metallurgiya, 1963. – 153 p.
2. Sigov A. A., Shurhal V. A. Aglomeracioniy process. Kiev: Tehnika, 1969. – 232 p.
3. Savel'ev S.G., Stojkova Ya.A. Matematicheskoe modelirovanie v isledovanii processov proizvodstva okuskovanogo syr'ya// Visnyk KrNU, #4, 2012. – P. 44-47.
4. Caplin A.I. Modelirovanie teplofizicheskikh procesov I ob'ektov v metalurgii// Perm': Izdatel'svo PGU, 2011. – 203 p.
5. Kalashnikov S. N. Matematicheskoe modelirovanie teplo-massoobmenih procesov v metalurgicheskikh agregatah na osnove ob'ektno-orientirovanoi tehnologii. Dis. g.t.n. Novokuznetsk. 278.
6. Bokovikov B. A. Matematicheskaya model objigovoj konveernoy mashini rfr instrument dlya optimizacii teplovoj shemi agregata. Stal. 9, 2010. P. 84-87.
7. Frolov U. A. Teplotehnicheskoe issledovanie processa aglomeracii I sovershenstvovanie tehnologii I tehniki proizvodstva aglomerata. Avtoref. dis. ... d.t.n. Ekaterinburg. 2005. 49 p.
8. Eliseev A. A. Issledovanie teplo-massoobmenih procesov pri aglomeracii shihty. Dis. k.t.n. Cherepovec. 2006. 165 p.
9. Mnyh A. S. Reshenie zadachi raspredeleniya temperaturi v edinichnom ob'eme aglomeracionogo sloya motodom konechnih elementov s uchetom vnutrenih istochnikov tepla. Zbirnyk naukovih prac DDTU (tehnichni nauky). 2(25), 2014. P. 47-51.
10. Mnyh A. S. Sintez trehmernoy modeli teplovogo regima procesa spekaniya aglomeracionoy shihty. Visnyk KrNU (zbirnyk naukovih prac). 38, 2014. – P. 44-47.
11. Baboshin V. M. Teplofizicheskie svoystva topliv I shihtovih materialov chernoj metalurgii// Moscow: Metallurgiya, 1982. – 152 p.
12. Mnyh A. S. Issledovanie teplovihi processov v aglomeriruemom sloe boksitov v zavisimosti ot segregacii topliva I himkomponentov po visote// Energetika. Energoberegenie. Energoaudit, # 6(136), 2015. – P. 23-27.

УДК 669.162.1

И.Г. Яковлева, д-р техн. наук, профессор, **А.С. Мных**, канд. техн. наук, доцент

Запорожская государственная инженерная академия

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В СЛОЕ БОКСИТОВОЙ ШИХТЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СПЕКАНИЯ

В работе проведен анализ текущего состояния вопроса моделирования агломерационного процесса и представлены результаты моделирования процесса спекания бокситовой шихты на разработанной автором конечно-элементной тепловой модели.

Исследовано время выгорания частички твердого топлива для условий рассматриваемого технологического процесса. Сделан расчет оптимального распределения коксовой мелочи, как по высоте, так и по ширине паллеты агломашины, с учетом аккумуляции теплоты вышележащими горизонтами агломерата, тем самым обеспечив выравнивание значений максимальной температуры зоны горения по горизонтам спека.

Проведенные исследования позволили установить не равномерный характер распределения задаваемой мощности, выделяемой в единичном объеме, как по высоте так и по ширине пирога, имеющей существенно увеличение в прибортовых зонах и постепенное уменьшение от верхних к нижним горизонтам слоя.

Результаты моделирования позволили сделать вывод о возможности снижения содержания топлива в шихте при условии соблюдения требуемой концентрации коксовой мелочи по горизонтам, что возможно при усилении сегрегации классов крупности загружаемого материала по высоте паллеты.

Ключевые слова: сегрегация, имитационная модель, метод конечных элементов, тепловой режим, горизонт слоя, шихта.

Надійшла 12.04.2015

Received 12.04.2015

RANS SIMULATION OF EFFECT OF AIR ADMISSION'S HOLES GEOMETRY IN A GAS TURBINE COMBUSTOR AND THEIR EFFECTS ON EMISSION CHARACTERISTICS

This study was carried out to investigate the effects of geometry and location of different air admission holes (secondary, dilution) on total temperature characteristics and formation of nitrogen oxide emissions in a can combustor flame tube, for 8 various cases, using computational fluid dynamics (CFD). The simulation has been performed using ANSYS CFX including laminar flamelet model, for simulation of non premixed methane-air combustion and thermal and prompt nitrogen oxide (NOx) formation was performed to predicting NOx emission characteristics with a K-epsilon model of turbulent.

Key words: air admission holes, emission, combustion, CFD, nitrogen oxide, combustor

Introduction. Nowadays, the optimization of combustion performance and the reduction of pollutant emissions require considerable research efforts from the gas turbine industry. The basic objectives in combustor design are to achieve easy ignition, high combustion efficiency and minimum pollutant emissions [1]. Environmental regulations on gas turbine, including NOx emissions, have been enhanced over the past several years. Therefore, technologies for accurately predicting the amount of NOx emission from the combustor, the emission source of the gas turbine engine, are very important [2].

Due to increasing global environmental awareness, the control of gas turbine emissions, targeting those in small quantities such as NOx, CO, has become more stringent. The combustor, which is one of the core components of an gas turbine engine and a source of such emissions, will increasingly become the focus of future engine development. Development of combustors for gas turbine engines typically takes considerable time and incurs large costs, because such development includes the process of fabricating an extensive amount of combustor hardware that complies with the required specifications using existing products and data, as well as the process of satisfying the performance specifications through trial and error, mainly through repeated experiments and design improvements. Therefore, if these processes can be substituted with numerical prediction, the time period and the cost of combustor development can be reduced considerably. However, because the internal flow of an gas turbine engine combustor consists of complicated phenomena, including turbulent mixing along with spraying, atomizing, and swirling of liquid and gas fuel, as well as a huge number of chemical reaction mechanisms, reproduction through numerical simulation is very difficult, and even today there are few tools with sufficiently high prediction accuracy for this purpose. In recent years, Large Eddy Simulation (LES), which has a small number of adjustment parameters for modeling and can simulate unsteady turbulent flow, has attracted a great deal of attention. However, LES has not been established as a practical design tool for actual combustors, because the atomization model and turbulence combustion model for the spray combustion field of LES are still in the study phase and the calculation load of LES is very high; therefore, significant computer resources are required. Accordingly, the main method used in current study is Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) simulation, which obtains a steady mean field where turbulence phenomena are averaged. RANS simulation has lower accuracy than LES, but it can be used sufficiently as a design tool through proper interpretation of its results due to its reasonable computational costs. [2]

The gas turbine can-combustor is designed to burn the fuel efficiently, reduce the emissions, and lower the wall temperature. In this study various geometrical parameters of air admission holes on the combustor liner, and position of dilution holes are changed to investigate the effect of these parameters on combustion chamber performance and emissions. In this study the mathematical models used for combustion consist of the PDF flamelet model for non-premixed methane-air combustion. The outcome of the work will help in finding out the geometry of the circular air supply on the combustion chamber liner, which will lead to less emission.

The flow visualization technique was demonstrated by Koutmos and McGuirk [3] in can-combustor model. They experimented a benchmark study on the investigation of the three-dimensional flow field water model. Flow visualization demonstrated that internal flow patterns simulated closely those expected in real combustors. The combustor comprised a swirl driven primary zone, annulus fed primary and dilution jets and an exit contraction nozzle. LDA measurements of the three mean velocity components and corresponding turbulence intensities were obtained to map out the flow development throughout the combustor. Besides providing information to aid understanding of the complex flow events inside combustors, the data are believed to be of sufficient quantity and quality to act as a benchmark test case for the assessment of the predictive accuracy of computational models for gas-turbine combustors. Aside from the flow visualization study, Eldrainy et al. [4] examined the flow inside the

combustor. The flow field inside the combustor is controlled by the liner shape and size, wall side holes shape, size and arrangement (primary, secondary, and dilution holes), and primary air swirler configuration. Air swirler adds sufficient swirling to the inlet flow to generate central recirculation region which is necessary for flame stability and fuel air mixing enhancement. Therefore designing an appropriate air swirler is a challenge to produce stable, efficient and low emission combustion with low pressure losses. The flow behavior was investigated numerically using CFD solver. This study has provided physical insight into the flow pattern inside the combustion chamber. The necessity of the problem is to evaluate the NO_x emission after the combustion process. There are strict regulations on aircraft emissions of pollutants like CO and NO_x, so combustors need to be designed to minimize those emissions. In this work, an examination about the emission of unburned gases is predicted by motility the air holes in the secondary chamber. The main objective of this study is to diminish the NO_x emission and to establish the effective location and size of secondary and dilution holes for cooling the combustion products.

In present study an attempt has been made through CFD approach to analyze the flow pattern with in combustion and through air admission holes and from these the temperature and NO distribution in the chamber as well as the temperature and NO quality at the exit of combustion chamber is obtained.

Combustor zones .a conventional combustor comprises of three basic zones - primary, intermediate and dilution.

Primary zone. The main function of the primary zone is to anchor the flame and provide sufficient time, temperature, and turbulence to achieve essentially complete combustion of the incoming fuel-air mixture. The importance of the primary-zone airflow pattern to the attainment of these goals cannot be overstated. Many different types of flow patterns are employed, but one feature that is common to all is the creation of a toroidal flow reversal that entrains and recirculates a portion of the hot combustion gases to provide continuous ignition to the incoming air and fuel. Some early combustors used air swirlers to create the toroidal flow pattern, whereas others had no swirler and relied solely on air injected through holes drilled in the liner wall at the upstream end of the liner . An important contribution to primary-zone aerodynamics was made by the Lucas combustion group in their combustor designs for the Whittle W2B and Welland engines. The basic airflow patterns embodied in the Lucas concept are sketched in Figure 1 . Note that both swirling air and primary air jets are used to produce the desired flow reversal. As already noted, each mode of air injection is capable of achieving flow recirculation in its own right, but if both are used, and if a proper choice is made of swirl vane angle and the size, number, and axial location of the primary air holes, then the two separate flow recirculations created by the two separate modes of air injection will merge and blend in such a manner that each one complements and strengthens the other. The result is a strong and stable primary-zone airflow pattern that can provide wide stability limits, good ignition performance, and freedom from the type of flow instabilities that often give rise to combustion pulsations and noise. The Lucas company had a strong influence on British combustor design, and the basic aerodynamic features shown in Figure 1 can be found in the combustors designed for many British engines, including the Rolls Royce Nene, Derwent, Dart, Proteus, Avon, Conway, and Tyne. [5]

Intermediate zone. If the primary-zone temperature is higher than around 2000 K, dissociation reactions will result in the appearance of significant concentrations of carbon monoxide (CO) and hydrogen (H₂) in the efflux gases. Should these gases pass directly to the dilution zone and be rapidly cooled by the addition of massive amounts of air, the gas composition would be “frozen,” and CO, which is both a pollutant and a source of combustion inefficiency, would be discharged from the combustor unburned. Dropping the temperature to an intermediate level by the addition of small amounts of air encourages the burnout of soot and allows the combustion of CO and any other unburned hydrocarbons (UHC) to proceed to completion. In early combustor designs, an intermediate zone was provided as a matter of course. As pressure ratios increased, and more air was required for combustion and liner-wall cooling, the amount of air available for the intermediate zone went down accordingly. By around 1970, the traditional form of intermediate zone had largely disappeared. However, the desirability of an intermediate zone remains; therefore, should the developments now being made in wall-cooling techniques allow some air to become available, consideration might be given to its possible reinstatement [5].(see Fig 2)

Dilution zones. The role of the dilution zone is to admit the air remaining after the combustion and wall cooling requirements have been met, and to provide an outlet stream with a temperature distribution that is acceptable to the turbine. This temperature distribution is usually described in terms of “pattern factor” or “temperature traverse quality.” The amount of air available for dilution is usually between 20 and 40% of the total combustor airflow. It is introduced into the hot gas stream through one or more rows of holes in the liner walls. The size and shape of these holes are selected to optimize the penetration of the air jets and their subsequent mixing with the main stream. In theory, any given traverse quality can be achieved either by the use of a long dilution zone or by tolerating a high liner pressure-loss factor. In practice, however, it is found that mixedness initially improves greatly with an increase in mixing length and thereafter at a progressively slower rate. This is why the length/diameter ratios of dilution zones all tend to lie in a narrow range between 1.5 and 1.8. For the very high turbine entry temperature (around 2000 K) associated with modern high-performance engines, an ideal pattern factor would be one that gives minimum temperature at the turbine blade root, where stresses are highest, and also

at the turbine blade tip, to protect seal materials. Attainment of the desired temperature profile is paramount, owing to its major impact on the maximum allowable mean turbine entry temperature and hot-section durability. Due to the importance and severity of the problem, a large proportion of the total combustor development effort is devoted to achieving the desired pattern factor. The locations of the three main zones described above, in relation to the various combustor components and the air admission holes, are shown in Figure 2. Note also in this figure the “snout,” which is formed by cowls that project upstream from the dome. The region inside the snout acts as a plenum chamber, providing a high uniform static pressure for feeding the air swirler, which is attached to the dome, the airblast atomizer, and the dome cooling airflows [5].

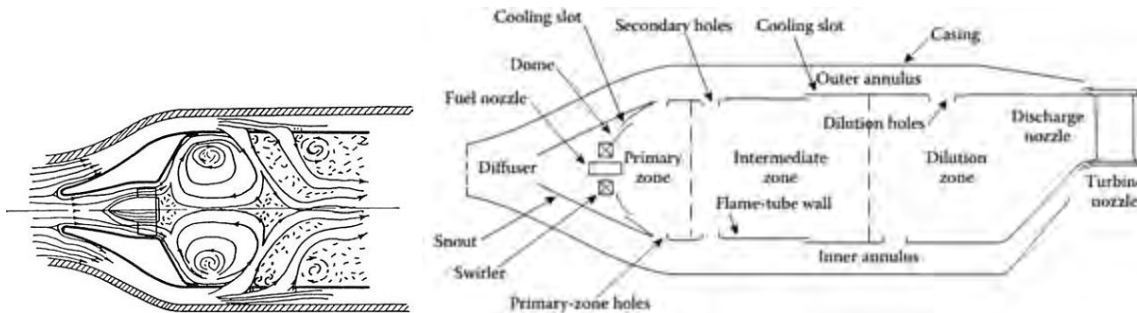


Fig1. Lucas primary-zone airflow pattern.

Fig2. Lucas Main components of a conventional combustor.

Governing equations and turbulence and combustion model. The mathematical equations describing the fuel combustion are based on the equations of conservation of mass, momentum, and energy together with other supplementary equations for the turbulence and combustion. The standard k-ε turbulence model is used in this paper. The equations for the turbulent kinetic energy k and the dissipation rate of the turbulent kinetic energy ϵ are solved. Several models of turbulence have been put forward by different authors. These models differ in complexity and range of applicability; they also involve the solution of different numbers of differential equations. The turbulence model incorporated in this work is the high Reynolds number k-ε two equation model. This model requires the solution of two differential equations, for the two turbulence properties: the kinetic energy of turbulence k , and its dissipation rate ϵ . The model is moderate in complexity. It has been extensively used by many investigations and has proved to be adequate over a wide range of flow situation. Here the governing differential equations are presented below in details (Launder, and Spalding, 1974).

Differential equations for turbulence-energy k and dissipation rate ϵ used in combustion are respectively as follows:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_g} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_g} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (2)$$

For non premixed combustion modeling. All the numerical simulation has been performed using the Computational Fluid Dynamics (CFD) commercial code ANSYS CFX release 16, including laminar flamelet model for modeling non-premixed methane-air combustion with 17 species and 55 reactions.

In the flamelet model chemical reaction rates are computed first (independent of the flow) and the relevant scalar properties are stored in lookup tables accessible by the flow solver. The instantaneous scalar properties ϕ (i.e., temperature, density, compositions) are represented as a function of the instantaneous mixture fraction Z and its variance Z''^2 , and the scalar dissipation χ : $\phi = \phi(Z, Z''^2, \chi)$. Mean scalar properties are then computed by integrating the instantaneous ϕ over an assumed β -PDF, and the results are stored in the lookup tables. In the flamelet approach, transport equations for the turbulent kinetic energy (k), its dissipation rate (ϵ), enthalpy, mixture fraction Z , and its variance Z''^2 (which is used to compute the scalar dissipation) are solved for each computational cell. These values are then used to extract mean scalar properties from the chemistry lookup tables. The flow field properties are updated and iterations continue until convergence criteria are met. The NO_x formation model (based on thermal and prompt mechanisms) is also included.

When modeling NO_x formation in methane-air combustion, the thermal NO and prompt NO are taken into account. In the simulation process, we solve the mass transport equation for the NO species, taking into account convection, diffusion, production and consumption of NO and related species. This approach is completely general, being derived from the fundamental principle of mass conservation. For thermal and prompt NO_x mechanisms, only the following NO species transport equation is needed:[6]

$$\rho \frac{\partial Y_{NO}}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} \right) + S_{NO} \quad (3)$$

The source term S_{NO} is to be determined for different NOx mechanism. Y_{NO} is mass fraction of NO species in the gas phase and D is effective diffusion coefficient.

Geometry of combustor ,meshing and boundary condition. The domain of simulation, is a can type of combustor. The geometrical sizes of the combustor, fuel injector , air swirler and the fuel inlet (methane) and oxidizer inlet (air) and all of the geometrical sizes of combustor are shown in fig.3 without any secondary or intermediate and dilution holes on flame tube (liner). Methane and air are entered in the domain separately. The model was meshed for simulating in a tetrahedrons meshing method, with about total number of 2016000 nodes, and 7 600 000 total number of elements including prismatic layers around the walls of combustor .The different boundary conditions applied for flow analysis of gas turbine can-type combustion chamber in this investigation, which they are inlet mass flow rate for both fuel and oxidizer entering the domain , outlet average static press ure and with no slip walls. Boundary condition information are shown in table1.

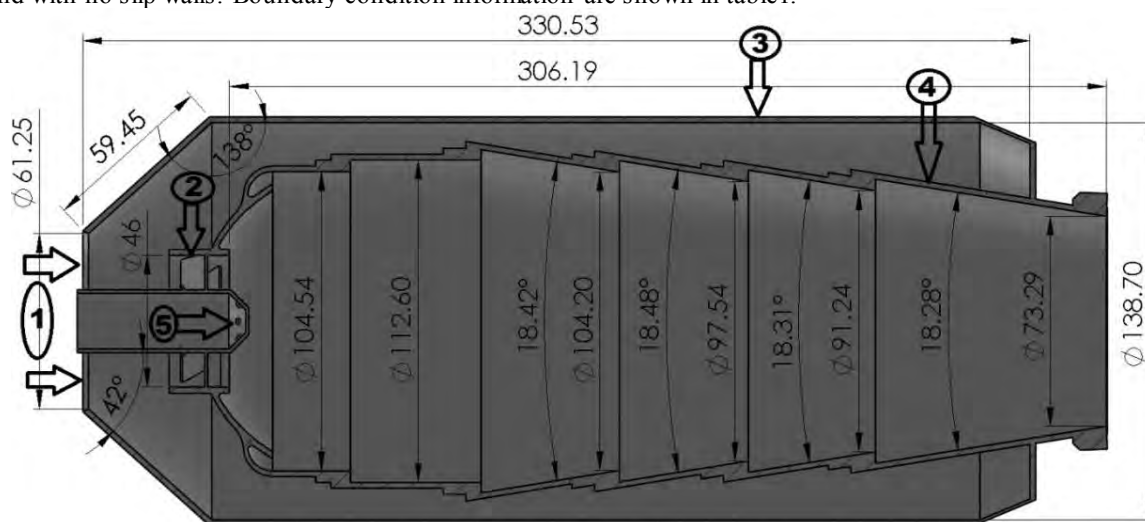


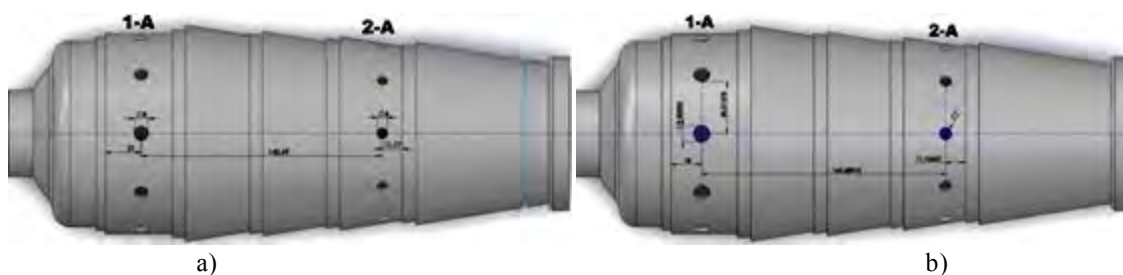
Fig3. Can-combustor 1-air inlet(diffuser) 2-axial swirler 3-casing 4-flametube(liner) 5-methan injector

Table1.

boundary condition information of combustor

Operating pressure (atm)	4
Temperature entering in combustor [K]	450
oxidizer mass flow rate [kg/s]	0.3
Temperature of fuel (K)	310
Fuel mass flow rate [kg/s]	0.004

Cases of study. in this study 8 cases of combustor with different geometrical parameters and location of primary and dilution holes were studied .The form of holes admissions are circular on flametube (liner) of combustor. The general form of air admission holes are shown in figure.4 on the combustor flame tube for 8 various cases. Each cases comprises its own air admission zones and their geometrical parameters and location. A zone is primary zone of air admission and B zone is secondary zone. Some cases comprises 2 zones for primary and 2 zone for secondary air admissions like cas-5 and case 2.



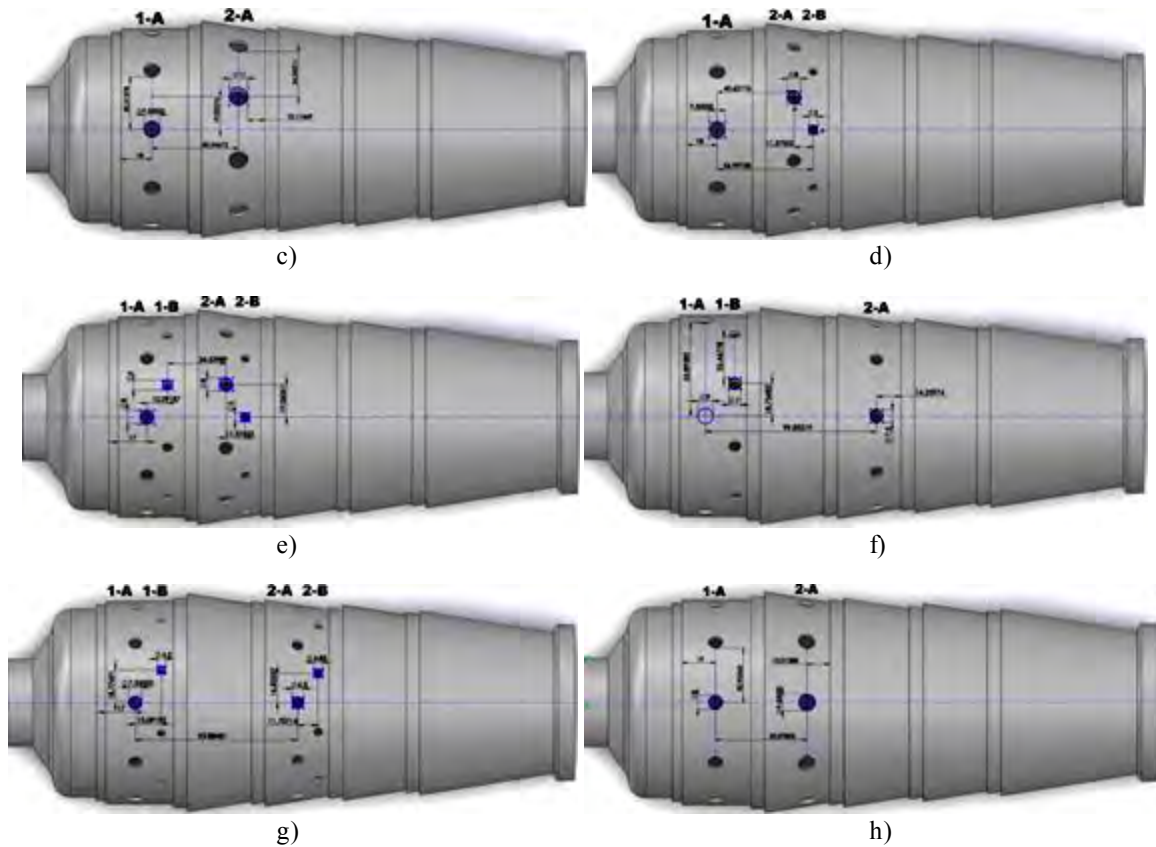


Fig4. Can-combustors with various geometry and location of air admission holes (a)case-1, b)case-2, c)case-3, d)case-4, e)case-5, f)case-6, g)case-7, h)case-8

The table of information of geometry and location of air admission holes. All of the information about the studied cases and detailed geometrical parameters of air admission holes of combustors are shown in table 2-3-4. Table 4 shows the axial distances each air admission holes to another zones.

Table2.

Geometrical parameters and locations of air admission holes for cases 1-4

cases	1		2		3		4		
zones	1-A	1-B	1-A	1-B	1-A	1-B	1-A	2-A	2-B
diameter (mm)	8	6	9.5	7	9.5	11	9.5	8	5
amount	10	10	10	10	10	10	10	10	10
location	parallel		parallel		Zig-zag		-	Zig-zag	
form	circular		circular		circular		circular		

Table3.

Geometrical parameters and locations of air admission holes for cases 5-8

cases	5				6			7				8	
zones	1-A	1-B	2-A	2-B	1-A	1-B	2-A	1-A	1-B	2-A	2-B	1-A	2-A
Diameter (mm)	8	6	8	5	9	7	7.5	7.5	4.5	6.5	4.85	8	9.5
amount	10	10	10	10	5	10	10	10	10	10	10	10	10
location	Zigzag		Zigzag		Zigzag		-	Zigzag		Zigzag		parallel	
form	circular				circular			circular				circular	

Table4.

axial distances of air admission holes from the center of circular holes from zone to another zones

cases	1	2	3	4	5	6	7	8
1-A to 2-A (mm)	140.69	143.69	50.54	45.62	46.62	17.1	93.88	52.1
1-A to 2-B (mm)	-	-	-	57	58	99.83	105.58	-
1-A to 1-B (mm)	-	-	-	-	12.1	82.73	15.1	-
1-B to 2-A (mm)	-	-	-	-	34.52	-	78.78	-
1-B to 2-B (mm)	-	-	-	-	45.9	-	90.48	-
2-A to 2-B (mm)	-	-	-	-	11.37	-	11.7	-

Results and discussion of simulation-(Total temperature and NO distribution in the 8 various cases).

All of 8 cases of simulation was performed in ANSYS CFX [7]. The convergence criteria in this simulation was at the RMS residual type with the 10^{-4} residual target and automatic time scale control and time scale factor of 1. All the simulation in 8 cases were converged successfully with solving the mass and momentum (U, V, W momentums), heat transfer (energy), turbulence (k-ε), mass fraction of NO, mixture fraction including mean and variance, temperature variance for predicting NO.

The high value of mass fraction of NO formed indicates an efficient combustion process. In all 8 cases the peak gas temperature is located in the primary zone where combustion of mixture air and methane takes place. The fuel from injector is first mixed in the swirling air before burning in the primary reaction zone. The gas temperature decreases after the primary zone. In case there will be dilution holes are provided at dilution zone, to reduce the temperature this can be done when the temperature inside the combustor is high.

The thermodynamic parameter called temperature influences the flow inside the combustion chamber. To prognosticate this parameter, the selection of air admission holes with respect to the location and geometry of them is necessary. Figures 5-12 demonstrates the total temperature and NO distribution for the can-combustor with different zones of air admission holes. The total temperature increases gradually due to the chemical reaction inside the main combustor. In all cases it is clear that after the location of first cooling zone and air admission holes, the temperature diminishes due to the cooling effect of air entering into combustor. Thus, it is distinct to show that the case 1 which has 2 zones of air admission holes, then in figure 5a there is 2203[K] of maximum total temperature in the first zone of combustion in combustor liner and the maximum and minimum total temperature is 1142[K] and 946[K] at the outlet area of combustor which has shown in figure 13a and besides that figure 5b shows that this case has the 167 ppm of maximum of NO concentration in whole combustor so the maximum NO concentration at the outlet area of this case is 16.77ppm and the minimum is 7.343ppm which has shown in figure 14a.

The case-2 has 2 zones of air admission holes, then in figure 6a there is 2181[K] of maximum total temperature in the first zone of combustion in combustor liner and the maximum and minimum total temperature is 1222[K] and 920[K] at the outlet area of combustor which has shown in figure 13b and besides that figure 6b shows that this case has the 167 ppm of maximum NO concentration in whole combustor so the maximum NO concentration at the outlet area of this case is 18.86ppm and the minimum is 6.8ppm which has shown in figure 14b.

The case-3 has 2 zones of air admission holes in a zigzag form of location, then in figure 7a there is 2221[K] of maximum total temperature in the first zone of combustion in combustor liner and the maximum and minimum total temperature is 1304[K] and 904[K] at the outlet area of combustor which has shown in figure 13c and besides that figure 7b shows that this case has the 130.8 ppm of maximum NO concentration in whole combustor so the maximum NO concentration at the outlet area of this case is 23.07ppm and the minimum is 4.437ppm which has shown in figure 14c.

The case-4 has 2 zones of air admission holes. The second zone has 2 rows of holes (2A-2B) in a zigzag form of location, then in figure 8a there is 2219[K] of maximum total temperature in the first zone of combustion in combustor liner and the maximum and minimum total temperature is 1253[K] and 965[K] at the outlet area of combustor which has shown in figure 13d and besides that figure 8b shows that this case has the 149.4ppm of maximum NO concentration in whole combustor so the maximum NO concentration at the outlet area of this case is 19.9ppm and the minimum is 5.83ppm which has shown in figure 14d.

The case-4 has 2 zones of air admission holes. The second zone has 2 rows of holes (2A-2B) in a zigzag form, then in figure 8a there is 2219[K] of maximum total temperature in the first zone of combustion in combustor liner and the maximum and minimum total temperature is 1253[K] and 965[K] at the outlet area of combustor which has shown in figure 13d and besides that figure 8b shows that this case has the 149.4ppm of maximum NO concentration in whole combustor so the maximum NO concentration at the outlet area of this case is 19.9ppm and the minimum is 5.83ppm which has shown in figure 14d.

The case-5 has 2 zones of air admission holes. The first and second zone have 2 separate rows of holes (1A-1B) and (2A-2B) in a zigzag location, then in figure 9a there is 2217[K] of maximum total temperature in the first zone of combustion in combustor liner and the maximum and minimum total temperature is 1597[K] and 755[K] at the outlet area of combustor which has shown in figure 13e and besides that figure 9b shows that this case has the 104.4ppm of maximum NO concentration in whole combustor so the maximum NO concentration at the outlet area of this case is 41.78ppm and the minimum is 1.537ppm which has shown in figure 14e.

The case-6 has 2 zones of air admission holes. The second zone (1A-1B) has 2 separate rows of holes in a zigzag location, then in figure 10a there is 2174[K] of maximum total temperature in the first zone of combustion in combustor liner and the maximum and minimum total temperature is 1213[K] and 890[K] at the outlet area of combustor which has shown in figure 13f and besides that figure 10b shows that this case has the 153.5ppm of maximum NO concentration in whole combustor so the maximum NO concentration at the outlet area of this case is 19.1ppm and the minimum is 7.33ppm which has shown in figure 14f.

The case-7 has 2 zones of air admission holes. The first and second zone have 2 separate rows of holes (1A-1B) and (2A-2B) in a zigzag location, then in figure 11a there is 2251[K] of maximum total temperature in the first zone of combustion in combustor liner and the maximum and minimum total temperature is 1415[K] and 849[K] at the outlet area of combustor which has shown in figure 13g and besides that figure 11b shows that this case has the 209.8ppm of maximum NO concentration in whole combustor so the maximum NO concentration at the outlet area of this case is 29.11ppm and the minimum is 5.61ppm which has shown in figure 14g.

The case-8 has 2 zones of air admission holes in a parallel location to each other, then in figure 12a there is 2235[K] of maximum total temperature in the first zone of combustion in combustor liner and the maximum and minimum total temperature is 1242[K] and 949[K] at the outlet area of combustor which has shown in figure 13h and besides that figure 12b shows that this case has the 210.7ppm of maximum NO concentration in whole combustor so the maximum NO concentration at the outlet area of this case is 23.17ppm and the minimum is 8.57ppm which has shown in figure 14h.

In this study the maximum total temperature of 2251[K] with the maximum 210ppm of NO concentration in the primary zone of combustion is for case-7 due to the minimum diameter of holes at first zone which has two rows of holes. This can lead a minimum amount of cooling air in the liner with minimum air penetration through the holes. The general overview of simulation results is presented in table 5.

The outlet parameters in this simulation is most important due to entering to the atmosphere. As we can see from the outlet results in figure-13 and 14, the minimal total temperature and NO concentration can be seen closer to the liner walls of combustor because of the penetration of cooling air into the combustor and the maximum value of them can be seen at the center of outlet area which are showed in figure 13 and 14. The geometry and diameter and location of the air admission holes and amount of air mass flow rate entering to the combustor can lead the flame to the center line of combustor if the diameters and amount of holes are too big this can make the flame instable and can lead the flame to the extinction phenomena.

Pressure loss factor determines the efficiency in combustion. Pressure loss factor should be minimum as possible, there by more pressurized gas will exists it can be determined from inlet and outlet pressures. In the model there is low pressure loss which shows effective pressure in the gas at the exit of the combustor. Beside that the numerical simulation shows that the maximum pressure loss of 2.14% in case-1 due to the 2 zones of air admission holes with minimum of the diameters of the holes and the second zone (1-B) of holes are situated closer to the outlet of combustor but the results has improved that the minimum pressure loss of 1.195 in case-3 due to the maximum diameters of air holes admission with a zigzag location. These 2 zones of holes in case-3 are situated closer to the primary zone of combustion which has the maximum temperature and concentration of NOx. The general overview of simulation results is presented in table 5.

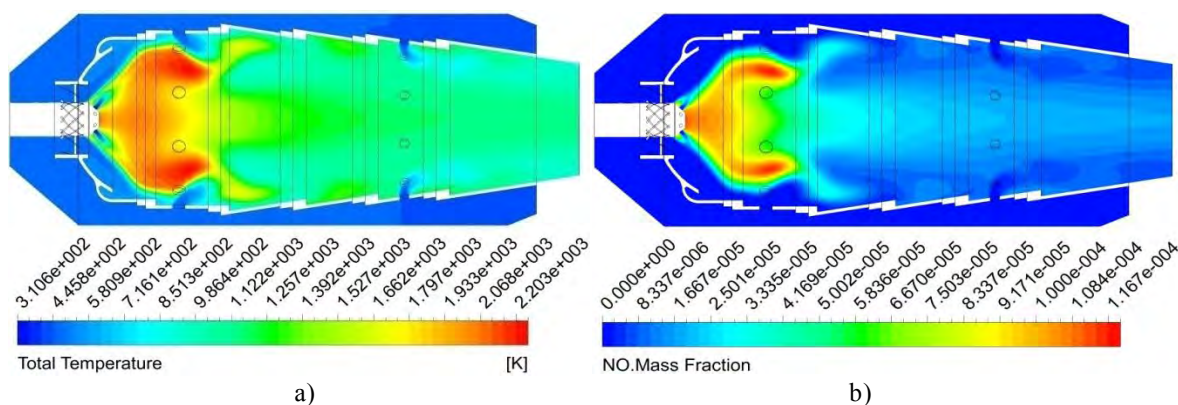


Fig 5. Result contours of simulation in case-1- a) Total temperature distribution. b) NO distribution

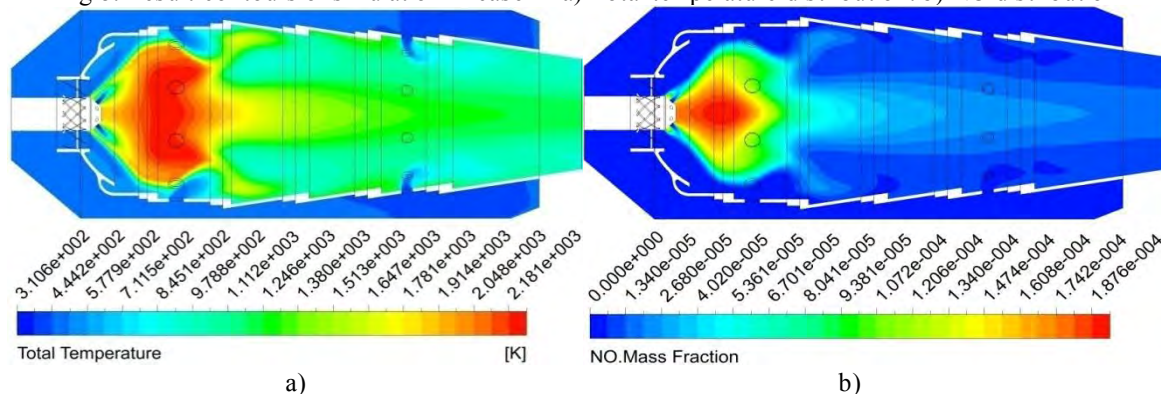


Fig 6. Result contours of simulation in case-2 -a) Total temperature distribution. b) NO distribution

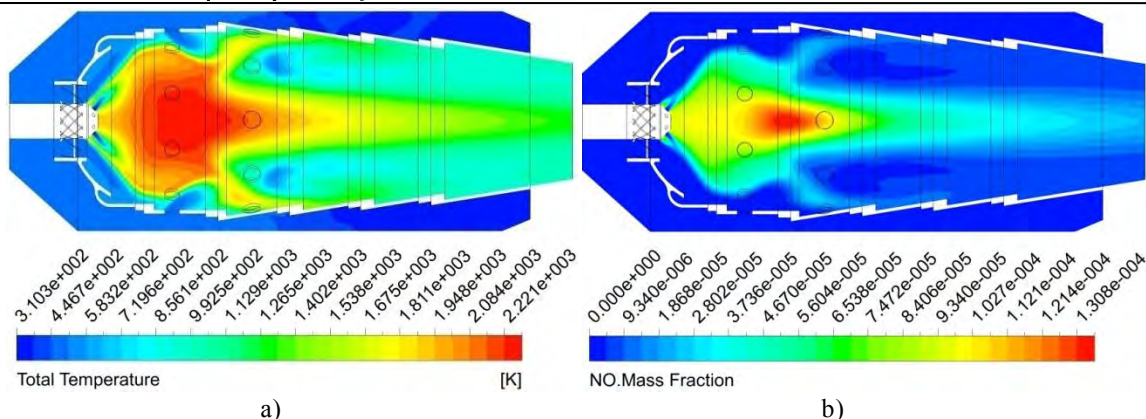


Fig 7. Result contours of simulation in case-3- a) Total temperature distribution. b) NO distribution

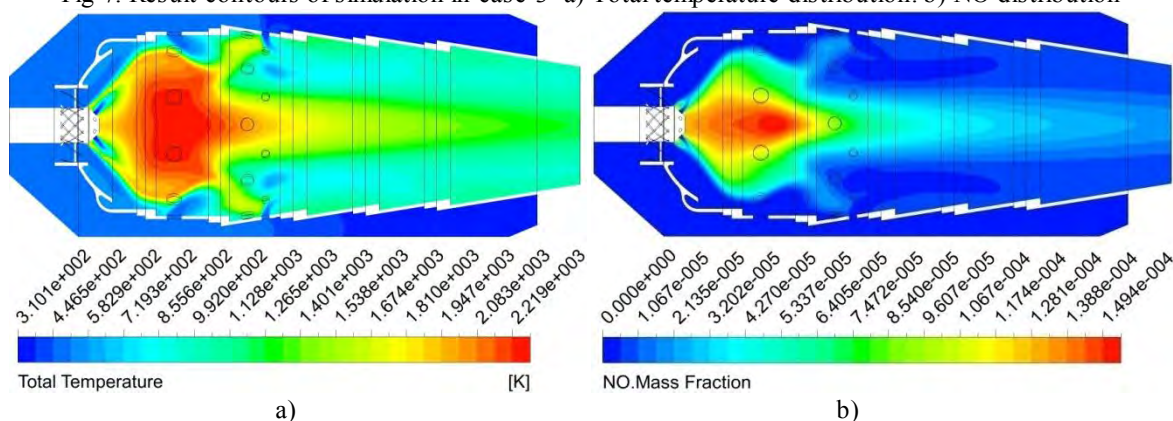


Fig 8. Result contours of simulation in case-4- a) Total temperature distribution. b) NO distribution

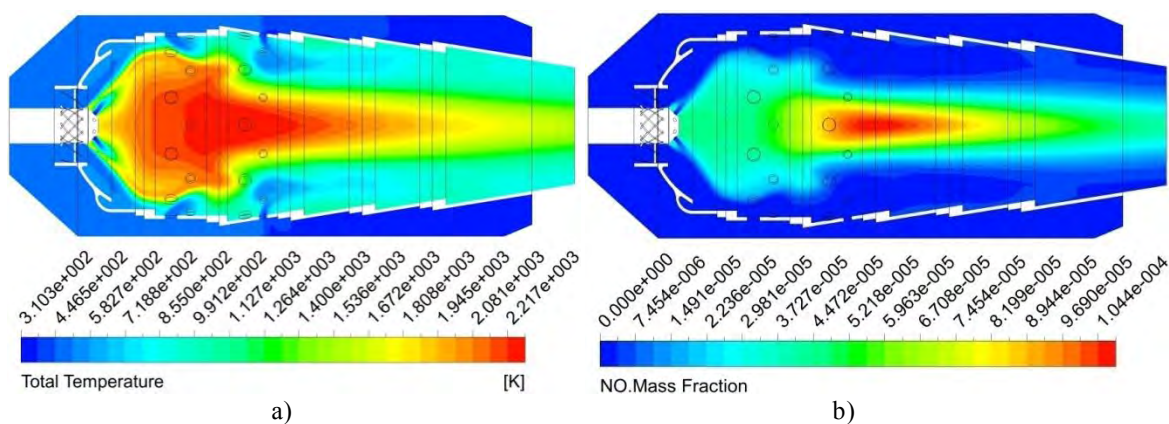


Fig 9. Result contours of simulation in case-5- a) Total temperature distribution. b) NO distribution

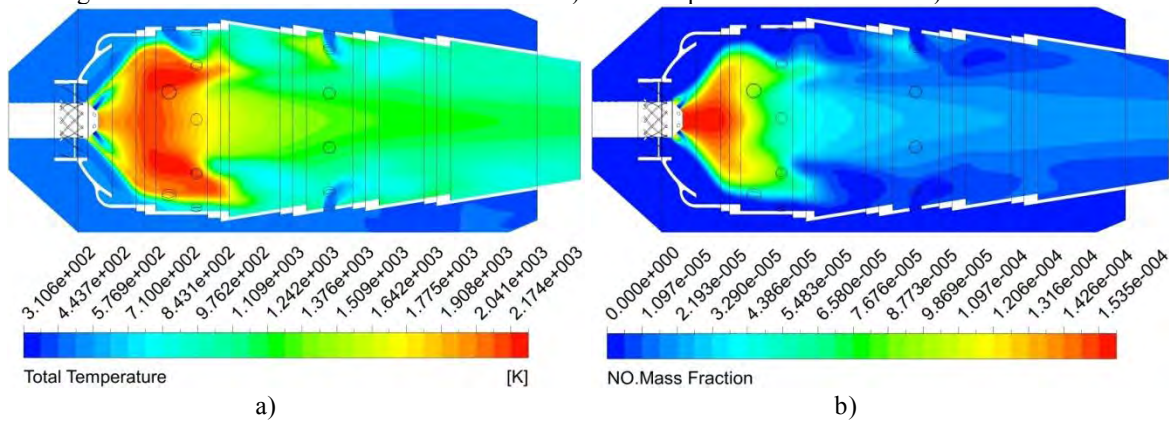


Fig 10. Result contours of simulation in case-6- a) Total temperature distribution. b) NO distribution

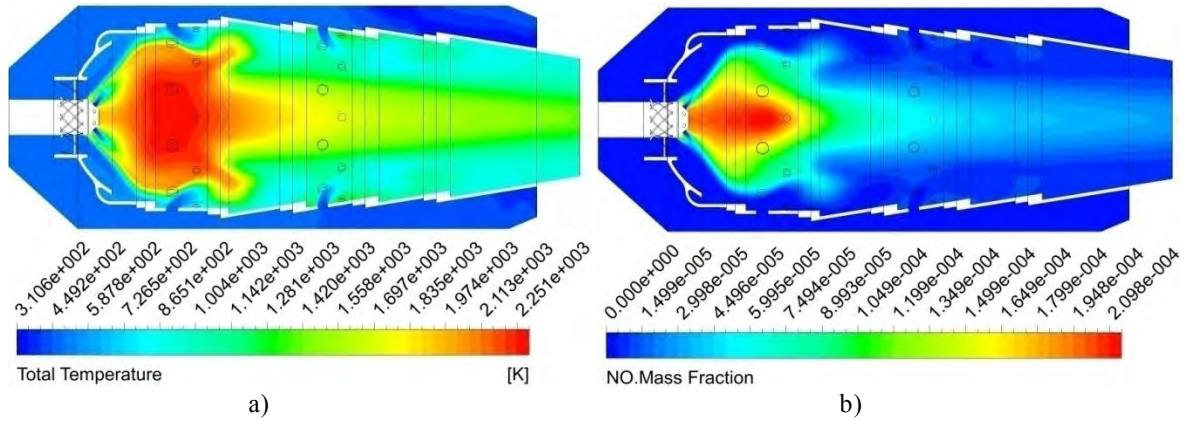


Fig 11. Result contours of simulation in case-7- a) Total temperature distribution. b) NO distribution

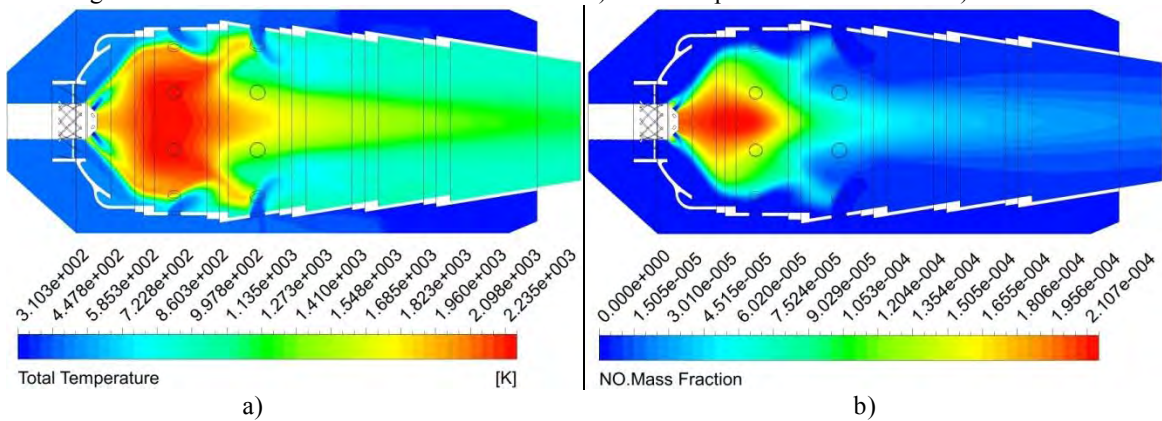


Fig 12. Result contours of simulation in case-8- a) Total temperature distribution. b) NO distribution

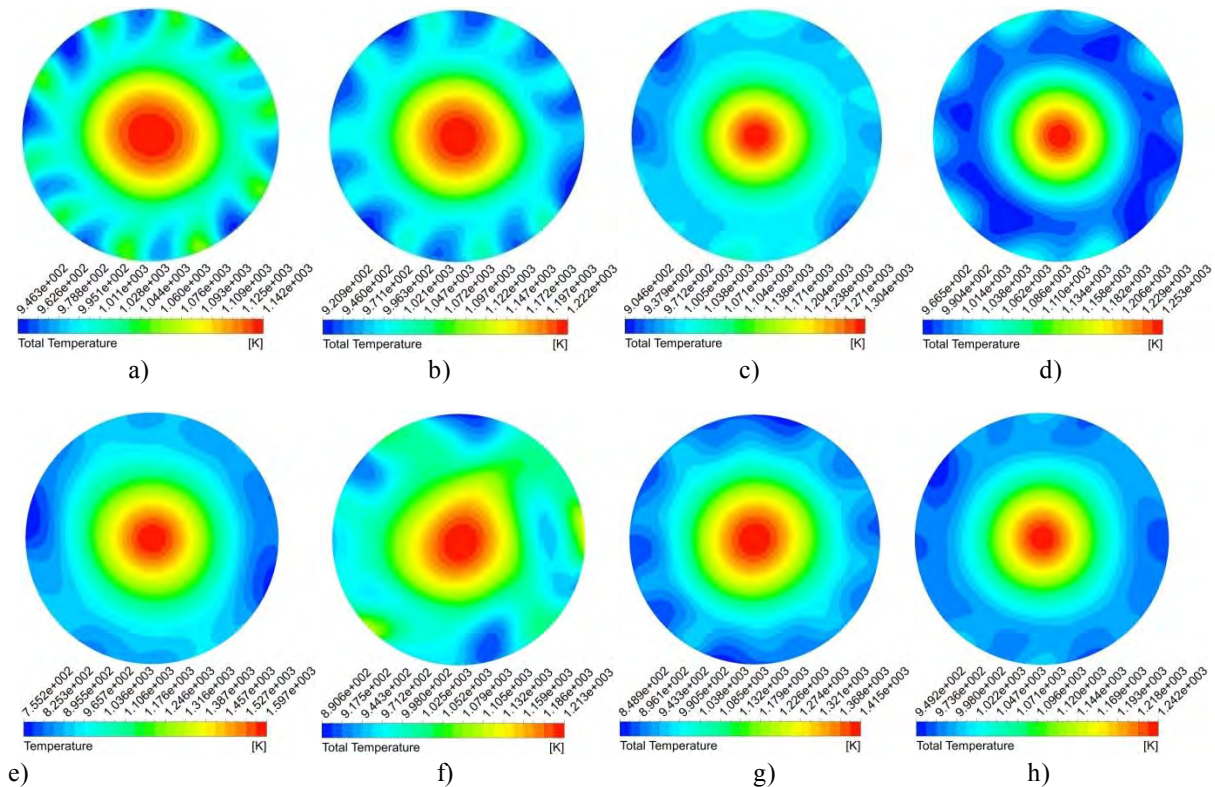


Fig 13. Total temperature distribution at the outlet of combustors for a)case-1, b)case-2, c)case-3, d)case-4, e)case-5, f)case-6, g)case-7, h)case-8

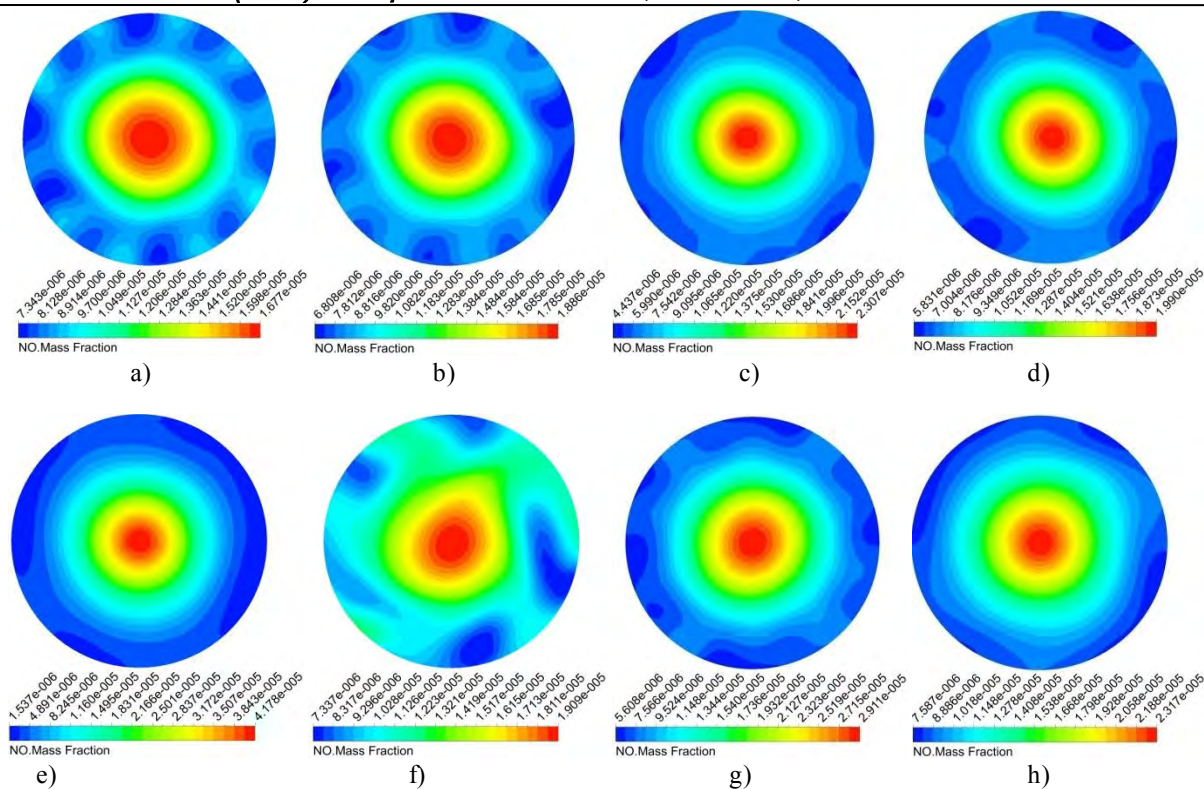


Fig 14. NO concentration distribution at the outlet of combustors for a)case-1, b)case-2, c)case-3, d)case-4, e)case-5, f)case-6, g)case-7, h)case-8

The diagrams of the results-a general overview of simulation results (total temperature and NO concentration)along the centerline of combustors at axial distance are presented in figure 15.

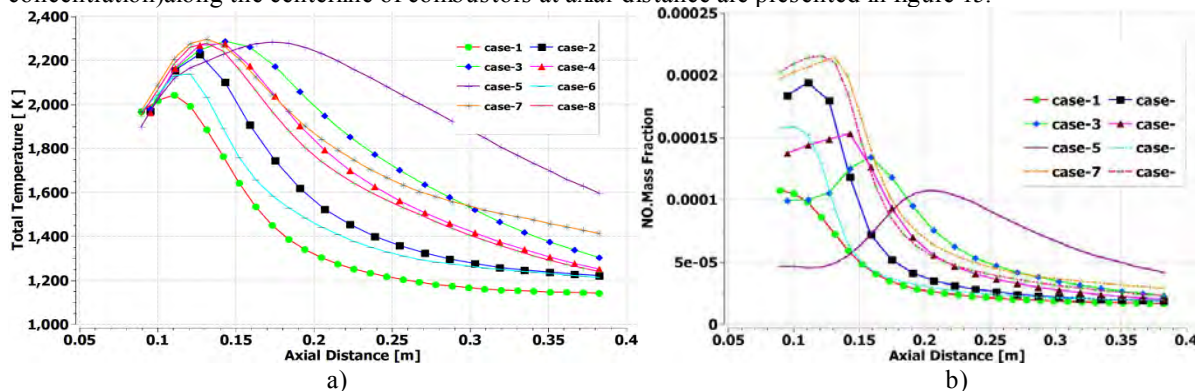


Fig 15. a)Total temperature distribution along the X plane (center line)of combustor b)NO mass fraction distribution along the X plane (center line) of combustor

Table 5.

Numerical results of maximum total temperature and NO distribution and pressure loss in 8 various combustors

Casese	Maximum NO (ppm) in combustor	Maximum Total Temperature [K] in combustor	Pressure loss %
Case-1	167	2203	2.14
Case-2	187.6	2181	1.635
Case-3	130.8	2221	1.195
Case-4	149.4	2219	1.347
Case-5	104.4	2217	1.295
Case-6	153.5	2174	1.597
Case-7	209.8	2251	1.613
Case-8	210.7	2235	1.536

Flow streamline and path along the combustor-In figure 16 we can see the flow path or trajectory along the combustor including the penetration streamlines through the combustor air hole admissions with different geometry of the holes in 8 cases of simulation.

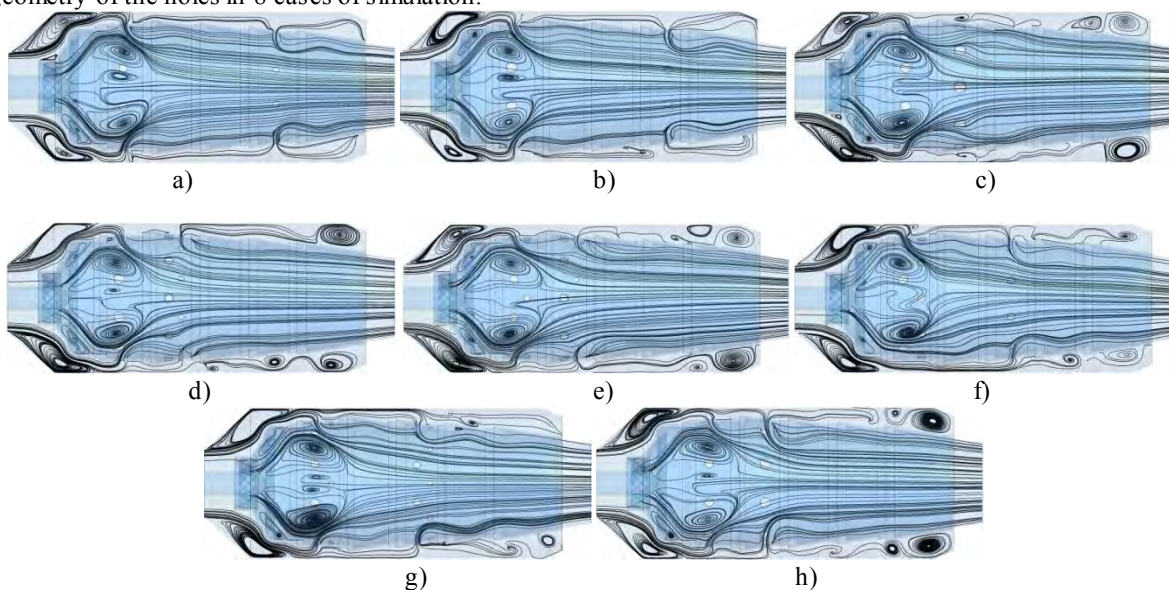


Fig.16.flow streamline of central recirculation region (CRZ) and flow penetration through the air admission holes into combustor liner along the XY plane of combustor in different cases: a)case-1 b)case-2 c)case-3 d)case-4 e)case-5 f)case-6 g)case-7 h)case-8

Velocity distribution along the combustor-The result of numerical 3-D simulation show that the velocity distribution in 8 cases of combustor depend on various geometry and location of air admission holes and their flow penetration through the holes which are shown in figure 17 for various cases.

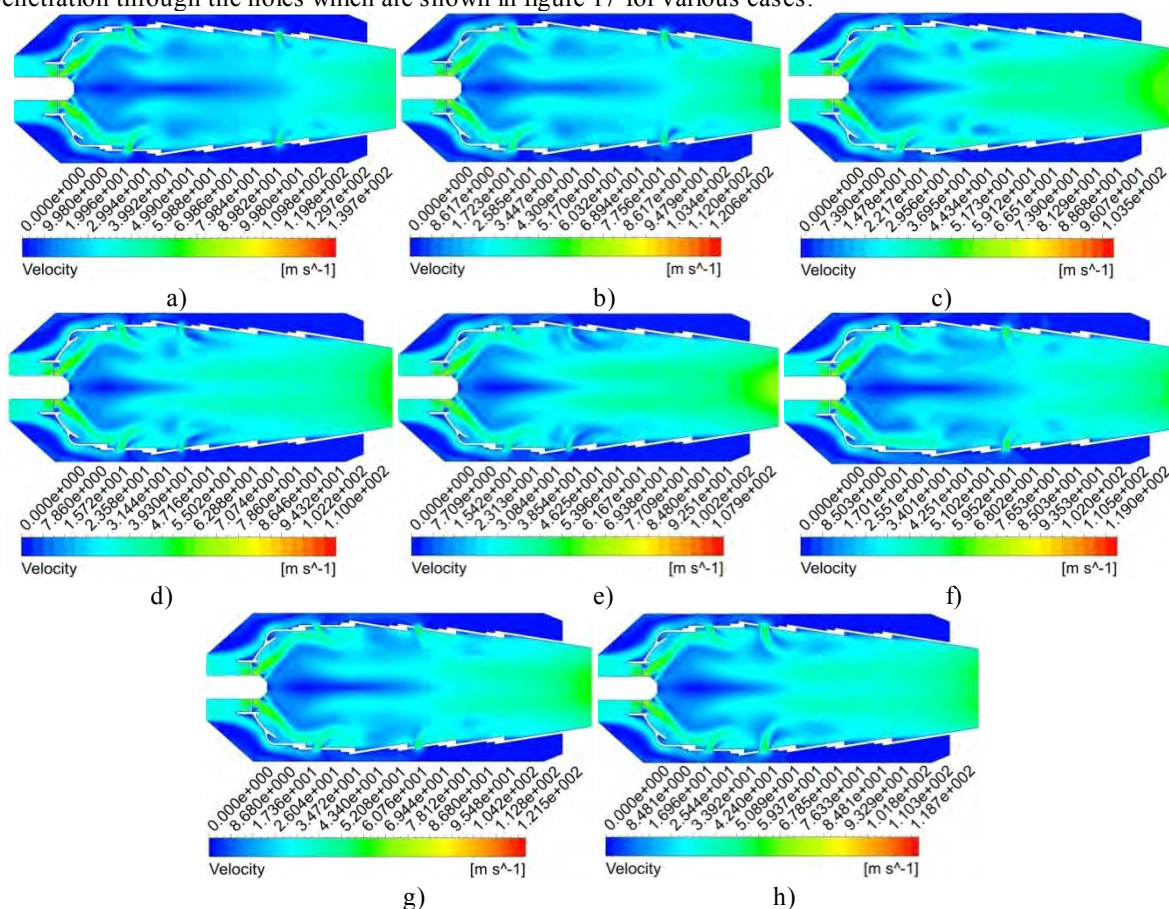


Fig.17.flow velocity distribution a)case-1 b)case-2 c)case-3 d)case-4 e)case-5 f)case-6 g)case-7 h)case-8

Conclusion- In this study, the effects of the air admission holes geometry and their location in a gas turbine can-combustor liner on NOx performance and temperature distribution were predicted using RANS simulation of computational fluid dynamics (CFD), including ANSYS CFX, for 8 various cases. The results indicated that the use of CFD allows qualitative prediction of the flow inside the combustor and NOx performance and total temperature in it. In all various cases the form and the structure of the flame were significant due to the penetration of air entering through the various air admission holes and their geometrical parameters and the location on the liner of combustor.

The results of this simulation showed that the instability of combustion and the minimum and the maximum rate of total temperature and formation of NOx has extremely depend on the right designing of air hole admissions it means their geometrical parameters and the location of them in a zigzag form or parallel, closer to the primary zone of combustion or closer to the dilution zone. As the results showed in this simulation every case of study has own properties such as outlet total temperature and NO concentration.

Significant topics of the research was the demonstration of the usefulness of advanced optimization techniques in combustor design and the preliminary validation of the combustion-emission model, a flamelet model of combustion, completed with the thermal and prompt NOx formation mechanism. Optimization still requires the use of considerably simplified models and a subsequent refinement phase based on the designer experience, but notwithstanding this is able to improve the design process effectiveness.

References

1. S. R. Razavi S. Tabejamaat. Numerical Simulation of Methane/Air Combustion with CO2 Dilution in A Gas Turbine Combustor. The 5th Fuel & Combustion Conference of Iran Iran University of Science and Technology- Feb. 2014 Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. HIDEKI. M. Effects of Dilution Flow Balance and Double-wall Liner on NOx Emission n Aircraft Gas Turbine Engine Combustors . Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 51 No. 4 (December 2014) p.9-15
3. P. Koutmos and J. J. McGuirk, "Isothermal flow in a gas turbine combustor—a benchmark experimental study," Experiments in Fluids, Vol. 7, 1989, pp. 344-354.
4. Y. A. Eldrainy, J. Jeffrie, and M. Jaafar, "Prediction of the flow inside a Micro Gas Turbine Combustor," Journal of Mechanical, vol. 25, 2008, pp. 50-63.
5. Arthur H. Lefebvre , Dillip R. Ballal . Gas turbine combustion alternative fuel and emissions /third edition CRC press Taylor and Francis group ,2010.p.560
6. JIANG Bin, Study on NOx Formation in CH4/Air Jet Combustion [Text] / LIANG Hongying ,HUANG Guoqiang, and LI Xingang ,Chinese J. Chem. Eng., vol 14(6)-2006-p.723—728
7. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX Release 16.0 [Электронный ресурс] / ANSYS, Inc. // Southpointe 275 Technology Drive. – Canonsburg : PA 15317, 2015. – 352 p. – 1 CD-ROM.

УДК 629-735

Д.А Долматов, канд. техн. наук, доцент
Масуд Хадживанд, Аспирант

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ» RANS МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ ВІКОН ПІДВЕДЕННЯ ПОВІТРЯ В КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ТА ЇЇ ВПЛИВУ НА ЕМІСІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Проведено дослідження впливу геометрії та розташування різних вікон підведення повітря (вторинних, розведення) на загальні температурні характеристики і формування викидів NOx в жаровій трубі трубчасто-кільцевої камери згоряння для 8 різних випадків за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки. Моделювання виконувалося за допомогою ANSYS CFX з використанням ламінарної flamelet моделі для дослідження згоряння метано-повітряної суміші без попереднього змішання. Проведено аналіз утворення теплових і швидких NOx для прогнозування емісійних характеристик з використанням k-ε моделі турбулентності.

Ключові слова: вікон підведення повітря, емісія, горіння, CFD, оксид азота, камера згоряння

УДК 629-735

Д.А Долматов, канд. техн. наук, доцент
Масуд Хадживанд, Аспирант

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» RANS МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОКОН ПОДВОДА ВОЗДУХА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Проведено дослідження впливу геометрії та розташування різних отворів підводу повітря (вторичних, розбавлення) на загальні температурні характеристики та формування викидів NOx в жаровій трубі трубчато-коліцевої камери згорання для 8 різних випадків з використанням методів чисельної гідродинаміки. Моделювання виконувалося з використанням ANSYS CFX з використанням ламінарної flamelet моделі для дослідження згорання метан-повітряної суміші без попереднього змішування. Проведено аналіз утворення теплових та швидких NOx для прогнозування емісійних характеристик з використанням k-ε моделі турбулентності.

Ключові слова: отвори підводу повітря, емісія, згорання, CFD, оксид азоту, камера згорання

Надійшла 05.10.2015

Received 05.10.2015

УДК 621.311.24

Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Лапікова О.І.
Запорізька державна інженерна академія

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ БІОГАЗОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Анотація. Біогазова енергетика має велику перспективу запровадження в Україні, але її розвиток значно гальмується через високі витрати енергії на інтенсифікацію метаногенезу (перемішування та підтримання температурного режиму в метантенку). Для підвищення ефективності виробництва біогазу необхідно розробити нові методи його інтенсифікації. Вплив електричних та магнітних полів на біомасу є недостатньо вивченим, але дослідження, проведені на різних групах мікроорганізмів, вказують на те, що при правильно підібраних параметрах він може спричинити значне збільшення обсягів продукованого біогазу і дозволити повністю або частково відмовитися від підігріву та перемішування. Це значно підвищить ефективність біогазових установок та енергетичну незалежність окремих господарств і держави в цілому. Але ці дослідження є неструктурованими і вибірконими та потребують подальшого узагальнення і уточнення, бажано, експериментально підтвердженого.

Ключові слова: Біогаз, біометаногенез, біореактор, метаноутворюючі бактерії, електромагнітне поле, ефективність.

Зростаючий дефіцит паливних ресурсів висуває на перший план гостру необхідність пошуку альтернативних джерел енергії, бажано, відновлюваних, до яких належить біогаз — суміш з 65% метану, 30% вуглекислого газу, 1% сірководню і незначних домішок азоту, кисню, водню і чадного газу [1]. В 1 м³ біогазу міститься енергія, еквівалентна 0,6 м³ природного газу, або 0,74 і 0,66 літри нафти чи дизельного палива, відповідно. Тобто, маючи достатню кількість згаданого енергоносія, можна значно зменшити залежність країни від імпортованих енергоносіїв.

Як правило, при виробництві метану значна кількість отриманої енергії витрачається на забезпечення процесу бродіння, а саме: дотримання необхідного температурного режиму всередині біореактору та перемішування субстрату, без яких ефективність процесу значно зменшується. Крім того, вона залежить як від обраної технології, матеріалів і конструкції основних їх елементів, так і від кліматичних умов у районах їх розташування. Середнє споживання виробленої енергії для забезпечення процесу в самому біореакторі у широтах України становить: теплової — 15-30%, й, додатково, електричної — 6-9 % [2]. При цьому після очищення біогазу від негорючих і шкідливих домішок його собівартість наближається до вартості природного, що може бути економічно недоцільним.

Відомо, що утворення біогазу відбувається при температурах від 0°C до 97°C і у цьому проміжку виділяють, умовно, три температурні режими [2]: психрофільний (до 20-25°C), мезофільний (25-40°C) і термофільний (понад 40°C). Перший спостерігається в установках без підігріву, в яких відсутній контроль

за температурою, і найбільш значне газовиділення відбувається при 23°C. Другий і третій, для яких оптимальними є 34-37°C і 52-54°C, відповідно, притаманні для біогазових установок, що працюють на змішаній сировині тваринного походження. При цьому, інтенсивність виділення метану збільшується із зростанням температури і обмежується утворенням в результаті зброджування вільного аміаку, що сповільнює процес. Тому, на практиці, поширення набули саме останні режими, перевагою яких є підвищена швидкість розкладання сировини і більш високий вихід біогазу, а також практично повне знищення хвороботворних бактерій, що містяться в сировині, що дозволяє використовувати залишки субстрату у якості біологічних добрив. До їх недоліків слід віднести велику кількість енергії, потрібної для підігріву субстрату в реакторі, чутливість процесу зброджування до мінімальних змін температури і дещо нижча якість отримуваних біодобрив.

З енергетичної точки зору, важлива тривалість технологічного циклу переробки біомаси, яка є визначальним фактором собівартості виробництва біогазу. В залежності від обраного температурного режиму і складу сировини повний час бродіння може перебувати в наступних інтервалах, днів [2]: психрофільний (30-40 і більше), мезофільний (10-20) і термофільний (5-10). При цьому час нагрівання субстрату до максимальної температури, як правило, становить від 46 до 68 годин, а кількість спожитої енергії в цей період перевищує 50% від загальної потреби на цикл.

Приблизно обсяги витрат на власні потреби для конкретної установки можна оцінити за технічними характеристиками виробника зазначеного обладнання, представленими в документації, але за їх відсутності або з метою уточнення для певної місцевості ефективність непроточного біореактору можна встановити методом розрахункового експерименту. В якості прикладу за методикою [4] було визначено тепловий баланс для метантенку, у якому цикл метаноутворення триває 19 днів за умов дотримання термофільного режиму [3] та типових кліматичних умов північних регіонів України в зимовий період. Динаміку температури та питомий вихід біогазу на 1 кг сухої біомаси зображено на рис. 1.

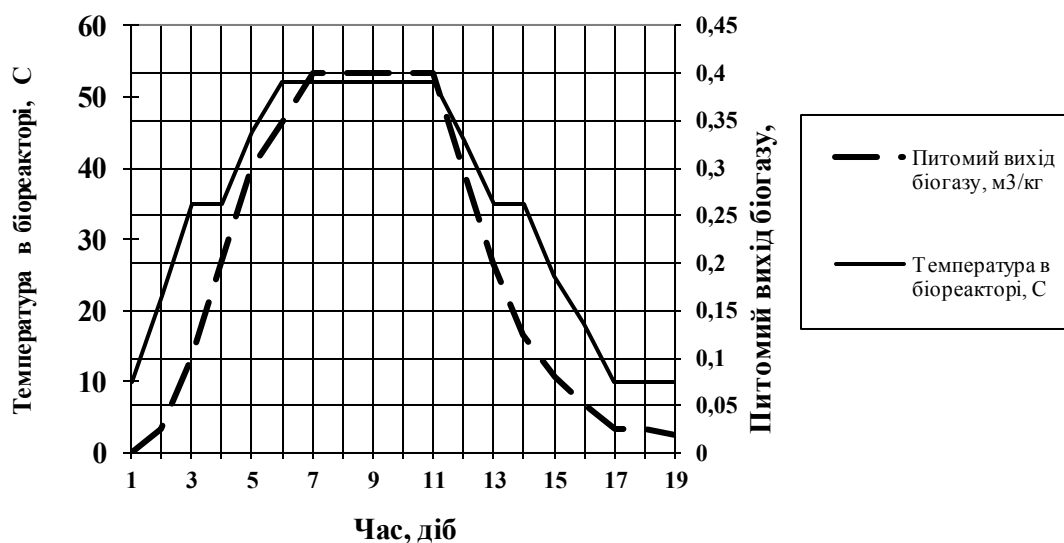


Рисунок 1 – Динаміка температури в реакторі а) та виходу біогазу б)

Для виробництва біогазу використано горизонтальний метантенк об'ємом 10 м³. Коефіцієнти заповнення та спорожнення біореактору при поступовому його завантаженні приймаються $q=0,7$ та $k=1$, відповідно. Середнє значення теплоємності субстрату $c_{суб}$ становить 4,18 кДж/(кг·К). Оптимальна вологість гною становить 92%. Середньомісячна швидкість вітру для визначення коефіцієнту теплообміну на зовнішній поверхні метантенку складає 2,6 м/с. Матеріалом стінки є сталь товщиною $\delta_{ст} = 7$ мм з коефіцієнтом теплопровідності 52 Вт/(м·К). Для зменшення тепловтрат застосовано мінераловатні листи товщиною 80 мм з теплопровідністю 0,05 Вт/(м·К). Тоді:

$$E_{Т.М.} = E_{П} + E_{Д} \quad (1)$$

де $E_{Т.М.}$, $E_{П}$, $E_{Д}$ – витрати теплоти в метантенку, на нагрів субстрату до температури бродіння, втрати в навколишнє середовище, відповідно, МДж/добу.

Кількість теплоти, що витрачається на підігрів біомаси визначається як:

$$E_{Т.М.} = m_{СУБ} \cdot c_{СУБ} \cdot (t_{бр} - t_{бм}) \quad (2)$$

де $m_{\text{суб}}$, $c_{\text{суб}}$ – маса та теплоємність субстрату, кг та МДж/(кг·К), відповідно; $t_{\text{бм}}$, $t_{\text{бр}}$ – початкова температура біомаси та температура бродіння, °С.

Тоді розсіювання енергії від метантенку в навколишнє середовище $E_{\text{д}}$ визначають за формулою:

$$E_{\text{д}} = 0,0036 \cdot k \cdot S_{\text{М}} \cdot (t_{\text{бр}} - t_{\text{д}}) \cdot \tau \quad (3)$$

де k – коефіцієнт тепловіддачі від субстрату до навколишнього середовища, Вт/(м²·К); $S_{\text{М}}$ – контактна площа поверхні метантенку, м²; $t_{\text{д}}$ – зовнішня температура, °С; τ – кількість годин роботи обладнання на добу.

Коефіцієнт тепловіддачі k визначається як:

$$k = \frac{1}{R_{\text{з}} + R_{\text{ІЗ}}} \quad (4)$$

де $R_{\text{з}}$, $R_{\text{ІЗ}}$ – термічний опір тепловіддачі зовнішньої поверхні і теплопровідності теплоізоляційного слою, м²·К/Вт.

Термічний опір тепловіддачі $R_{\text{з}}$ визначають з виразу:

$$R_{\text{з}} = \frac{1}{\alpha_{\text{з}}} \quad (5)$$

де $\alpha_{\text{з}}$ – коефіцієнт теплообміну зовнішньої поверхні метантенку, Вт/(м²·К).

Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні метантенку залежить також від швидкості вітру:

$$\alpha_{\text{з}} = 11,6 + 7 \cdot \sqrt{v_{\text{в}}} \quad (6)$$

де $v_{\text{в}}$ – швидкість вітру, м/с.

Термічний опір теплопровідності теплоізоляційного слою визначається за формулою:

$$R_{\text{ІЗ}} = \frac{\delta_{\text{СМ}}}{\lambda_{\text{СМ}}} + \frac{\delta_{\text{ІМ}}}{\lambda_{\text{ІМ}}} \quad (7)$$

де $\delta_{\text{СМ}}$, $\delta_{\text{ІМ}}$ – товщина стінки та слою теплоізоляції метантенку, м; $\lambda_{\text{СМ}}$, $\lambda_{\text{ІМ}}$ – коефіцієнт теплопровідності стінки і теплоізоляції, Вт/(м·К).

Оскільки формула для визначення залежності щільності гною від його вологості має вигляд:

$$\rho_{\text{Г}} = 1624 - 6,24 \cdot W_{\text{Г}} \quad (8)$$

маса завантаженого субстрату в метантенк визначається як:

$$m = V_{\text{М}} \cdot k \cdot q \cdot \rho_{\text{Г}} = V_{\text{М}} \cdot k \cdot q \cdot (1624 - 6,24 \cdot W_{\text{Г}}) \quad (9)$$

Результати розрахунків зведено до таблиці 1.

Відсоток корисної енергії, який використовується на забезпечення власних теплових потреб, визначається як:

$$\eta = \frac{E_{\text{т.м.}}}{E_{\text{б}}} \cdot 100\% \quad (10)$$

де $E_{\text{б}}$ – енергія, що міститься в отриманому біогазі.

Таблиця 1 – Результати розрахунків енергетичного балансу

№ доби	Температура, °С	Питомий вихід біогазу, м ³ /кг	Енергія, що міститься в отриманому біогазі, ГДж	Енергія на власні потреби, ГДж	Корисна енергія, ГДж
1	10	0	0	3,085	-3,085
2	22	0,025	0,367	4,638	-4,270
3	35	0,1	1,47	5,039	-3,569
4	35	0,2	2,94	0,047	2,893
5	45	0,3	4,41	3,901	0,509
6	52	0,35	5,145	2,758	2,387
7	52	0,4	5,88	0,07	5,809
8	52	0,4	5,88	0,07	5,809
9	52	0,4	5,88	0,07	5,809
10	52	0,4	5,88	0,07	5,809

Продовження таблиці 1

№ доби	Температура, °С	Питомий вихід біогазу, м3/кг	Енергія, що міститься в отриманому біогазі, ГДж	Енергія на власні потреби, ГДж	Корисна енергія, ГДж
11	52	0,4	5,88	0,07	5,809
12	44	0,3	4,41	0,059	4,351
13	35	0,2	2,94	0,047	2,893
14	35	0,125	1,837	0,047	1,791
15	25	0,08	1,176	0,033	1,142
16	18	0,05	0,735	0,023	0,711
17	10	0,025	0,368	0,013	0,355
18	10	0,025	0,368	0,013	0,354
19	10	0,02	0,294	0,013	0,281
Σ		3,8	55,860	20,067	35,792

Отже, порівнявши енергію, яка використовується на власні потреби, і корисну, видно, що 35,93% виробленого біогазу витрачається на забезпечення необхідного температурного режиму в реакторі, що є вкрай нераціональним і значно знижує ефективність використання біогазових технологій в цілому.

Оскільки традиційні способи підвищення енергоефективності таких установок майже вичерпали себе, необхідним є визначення можливості інтенсифікації процесу виробництва біогазу іншими засобами і методами, наприклад, стимуляцією мікроорганізмів, що беруть в ньому участь, електричними і магнітними полями.

Дослідження іноземних науковців показали [5], що зазначений вплив певних параметрів, інтенсивності та тривалості здатен активізувати діяльність деяких з метаноутворюючих бактерій, значно підвищити швидкість засвоєння ними сировини та збільшити газовиділення. Наприклад, обробка субстрату електромагнітним випромінюванням надвисокої частоти впродовж 2 годин перед завантаженням в біореактор викликала збільшення концентрації метану в продукovanій суміші газів на 45,9 % [6]. Суттєвий ефект, а саме двократне збільшення продуктивності, спостерігається у різних бактерій, дріжджів і найпростіших після застосування змінного поля, створеного 5 або 6-полюсною системою на різних частотах [7]. Подібні результати отримано і для більш широких груп мікроорганізмів, але, в цілому, ці дослідження є неструктурованими та вибірковими, і потребують подальшого уточнення і узагальнення, бажано, експериментально підтвердженого.

Оскільки на різних етапах біометаногенезу виявляють активність різні групи мікроорганізмів, оптимальний характер стимуляції яких може суттєво відрізнятися, є доцільним розглянути можливість встановлення динамічного режиму впливу на біомасу. Після його розробки, промислове застосування запропонованого методу інтенсифікації процесу могло б призвести до суттєвого скорочення витрат на підігрів та перемішування або, навіть, повної відмови від них, а отже, підвищити енергоефективність біогазових установок, знизити собівартість виробленого біогазу та, в подальшій перспективі, наблизити як окремі підприємства, так і державу в цілому до енергетичної незалежності.

Висновки. Біогаз є одним з найбільш перспективних для України видів відновлюваних джерел енергії через його відносну доступність і наближений до природного газу хімічний склад. Однак, широке розповсюдження біогазових технологій стримує низька їх ефективність і висока енерговитратність забезпечення процесу біометаногенезу, а методи інтенсифікації виробництва, а саме нагрівання та перемішування, вимагають високих витрат теплової та електричної енергії, та, фактично, вичерпали себе. Одним з імовірних, але недостатньо досліджених методів впливу на біомасу є застосування електричних та магнітних полів.

Встановлено, що на різних етапах виробництва цього енергоресурсу задіяні окремі мікроорганізми, тому доцільним є дослідження можливості застосування різного роду та змінного в часі зазначеного впливу на біомасу, що, імовірно, зможе дозволити зменшити залежність від нагрівання і перемішування, а отже, значно підвищити загальну ефективність біогазових установок.

Список літератури

1. Баадер В., Донэ Е., Брендерфельд М. «Биогаз: теория и практика» М., 1982.
2. Эдер Б., Шульц Х. «Биогазовые установки. Практическое пособие под научной редакцией Реддиха И.А.», Zorg Biogas, 2011.
3. Петров С.В., Решетникова И.В., Вохмин В.С. «Применение электротехнологий при метановом сбраживании отходов», Инженерный вестник Дона, 3, 2012.

4. Полищук В.М., Дубровин В.А., Полищук А.В. «Энергетический баланс метантенка биогазовой установки», К., 2014.
5. Hunt R.W., Zavalin A., Bhatnagar A., Chinnasamy S. and Das K. Electromagnetic «Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy. Applications» International Journal of Molecular Sciences, Int. J. Mol. Sci. 2009, 10.
6. Banik S., Bandyopadhyay S., Ganguly S., Dan D. «Effect of microwave irradiated Methanosarcina barkeri DSM-804 on biomethanation», Bioresour. Technol. 2005.
7. Zavalin A., Lensky V., McCarrol P., Westbrook R., Collins W.E., Morgan S. «Biostimulation of microorganisms exposed to multipolar systems of mutually compensated EMF» Bioelectromagnetics 2009.

Kachan Y.G., Kovalenko V.L., Lapikova O.I.

ANALYSIS OF EFFICIENCY AND DEVELOPMENT PROSPECT OF BIOGAS ENERGETIC

Biogas energy has a great prospect of input in Ukraine, but its development is considerably braked through the high charges of energy on intensification of methanogenesis (interfusion and maintenance of temperature condition in a methane-tank). To increase the efficiency of biogas production it is necessary to work out the new methods of its intensification. Influence of the electric and magnetic fields on biomass is studied not enough, but the researches conducted on the different groups of microorganisms shows that the electromagnetic influence with correct parameters can increase the volumes of produced biogas and allow to give up heating and interfusion fully or partly. It will promote efficiency of biogas options and power independence of businesses and state. But these researches are unstructured and selective and need further generalization and clarification, it is desirable, experimentally confirmed.

Key words: Biogas, methanogenesis, bioreactor, methane bacteria, electromagnetic field, efficiency.

References

1. Baader V., Done E., Brenderfel'd M. «Biogas: Theory and Practice» M., 1982.
2. Eder B., Shul'ts Kh. «Biogas plants. Practical Guide under the scientific editorship Reddiha IA», Zorg Biogas, 2011.
3. Petrov S.V., Reshetnikova I.V., Vokhmin V.S. «The use of electro with the methane fermentation of waste», Inzhenernyy vestnik Dona, 3, 2012.
4. Polishchuk V.M., Dubrovin V.A., Polishchuk A.V. «The energy balance of the digester biogas plant», К., 2014.
5. Hunt R.W., Zavalin A., Bhatnagar A., Chinnasamy S. and Das K. Electromagnetic «Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy. Applications» International Journal of Molecular Sciences, Int. J. Mol. Sci. 2009, 10.
6. Banik S., Bandyopadhyay S., Ganguly S., Dan D. «Effect of microwave irradiated Methanosarcina barkeri DSM-804 on biomethanation», Bioresour. Technol. 2005.
7. Zavalin A., Lensky V., McCarrol P., Westbrook R., Collins W.E., Morgan S. «Biostimulation of microorganisms exposed to multipolar systems of mutually compensated EMF» Bioelectromagnetics 2009.

УДК 621.311.24

Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Лапікова О.І.

Запорожская государственная инженерная академия

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ БИОГАЗОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Биогазовая энергетика имеет большую перспективу внедрения в Украине, но ее развитию существенно препятствуют высокие энергозатраты на интенсификацию метаногенеза (перемешивание и поддержание температурного режима в метантенке). Для повышения эффективности производства биогаза необходимо разработать новые методы его интенсификации. Воздействие электрических и магнитных полей на биомассу недостаточно изучено, но исследования, проведенные на разных группах микроорганизмов, указывают на то, что при правильно подобранных параметрах он может обусловить существенное увеличение объемов вырабатываемого биогаза и позволить полностью или частично отказаться от подогрева и перемешивания. Это существенно повысит эффективность биогазовых установок и энергетическую независимость отдельных хозяйств и государства в целом. Но эти исследования являются неструктурированными и выборочными и требуют последующего обобщения и уточнения, желательно, экспериментально подтвержденного.

Ключевые слова: Биогаз, биометаногенез, биореактор, метанообразующие бактерии, электромагнитное поле, эффективность.

Надійшла 21.05.2015

Received 21.05.2015

О.В. КОЦАР, канд.техн.наук, доцент, Д.К. ТКАЧЕНКО
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

КЕРУВАННЯ ДАНИМИ ОБЛІКУ В УМОВАХ ЗАПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ ЛІБЕРАЛІЗОВАНОГО РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Анотація. В статті досліджено цілі, завдання та моделі керування даними обліку в умовах запровадження в Україні лібералізованого ринку електричної енергії. На підставі аналізу результатів функціонування автоматизованих систем контролю, обліку та керування енерговикористанням (АСКОЕ) суб'єктів енергоринку зроблено висновок, що ефективно впровадження ринку двосторонніх договорів і балансуєчого ринку (РДДБР) можливе лише за умови побудови стійкої моделі керування даними обліку за різних моделей ринку електричної енергії України та на перехідних етапах. За результатами аналізу світового досвіду застосування різних моделей керування даними вимірювань зроблено висновок щодо доцільності запровадження в Україні централізованої моделі, яка створює найкращі умови для забезпечення повноти, достовірності та актуальності даних обліку. Запропоновано низку організаційно-технічних заходів і визначено основні етапи переходу від децентралізованої до централізованої моделі керування даними обліку в ринку електричної енергії України шляхом вдосконалення взаємодії АСКОВЕ суб'єктів енергоринку та Інформаційно-обчислювального комплексу (ІОК) Головного оператора, побудови розподіленої бази даних вимірювань й обліку електричної енергії і забезпечення регламентованого дистанційного автоматизованого доступу всіх заінтересованих сторін до даних обліку електричної енергії, зокрема до первинних даних обліку в уніфікований спосіб на рівноправних засадах.

Ключові слова: вимірювання, дані комерційного обліку, керування даними, облік, первинна база даних, первинні дані обліку, ринок електричної енергії, уніфікований протокол передавання даних вимірювань.

Вступ

Сучасні світові тенденції розвитку електроенергетики спрямовані на лібералізацію ринків електричної енергії з метою забезпечення конкурентного доступу кінцевих споживачів до електроенергетичних ресурсів за справедливими цінами. Врешті решт така стратегія переслідує дві головні мети: скорочення використання викопного палива та зменшення шкідливих викидів. Однією з невід'ємних умов досягнення зазначених цілей є забезпечення надійного контролю та обліку електричної енергії на всіх етапах її виробітку, передавання, розподілення та використання. Саме тому інтелектуалізація вимірювань та побудова ефективної моделі керування даними обліку електроенергії є одним з першочергових завдань під час запровадження в Україні ринку двосторонніх договорів та балансуєчого ринку (РДДБР) [1].

Мета і завдання

Метою роботи є удосконалення ієрархічної багатфакторної математичної моделі електричного навантаження досліджуваного кінцевого споживача з метою підвищення точності середньострокового прогнозування шляхом врахування впливу технологічних, виробничих, режимних та інших факторів на індивідуальні режими електроспоживання.

Матеріал та результати досліджень

Keuring van Elektrotechnische Materialen te Arnhem (КЕМА) визначає такі ознаки смарт вимірювань [2]:

- автоматичне зчитування, оброблення та передавання даних вимірювань;
- можливість двостороннього обміну даними із смарт лічильниками в реальному часі або з невеликою затримкою;
- підтримка додаткових послуг та можливостей, наприклад, автоматизація будинку, дистанційне припинення/відновлення електропостачання або обмеження навантаження;
- можливість дистанційного оновлення попередньо встановленого програмного забезпечення (ПЗ) смарт лічильника з метою надання нових послуг, змінення комунікаційних протоколів тощо.

КЕМА наполягає, що вимірювання може бути визнано «смарт» виключно за наявності всіх вищенаведених ознак. Також важливо зазначити, що впровадження смарт вимірювань вимагає наявності розвинутої інфраструктури, що об'єднує смарт лічильники, з'єднані комунікаціями зі всіма учасниками процесу, та засоби керування даними вимірювань, яка в свою чергу пов'язана з автоматизованими системами обліку та формування рахунків за користування електричною енергією.

Конкретний набір функцій смарт вимірювань залежить від місцевих обставин і може мати на меті

підвищення якості сервісу, що надаються постачальниками послуг, автоматичне формування рахунків за користування електричної енергії, дистанційне керування електричним навантаженням, запобігання шахрайству, підвищення рівня автоматизації тощо. Але, якщо йдеться про електроенергетичні ринки, то завдання керування даними обліку електроенергії набуває набагато важливішого значення, оскільки повнота, достовірність та актуальність даних обліку безпосередньо впливає на справедливість розрахунків за електричну енергію [3].

З огляду на те, що дані обліку може бути визнано достовірними лише у разі, якщо вони базуються на даних вимірювань, в подальшому терміни «керування даними обліку» і «керування даними вимірювань» будемо вважати рівнозначними.

У більшості країн Європейського Союзу (ЄС) відповідальність за впровадження систем обліку електроенергії (інсталяцію, обслуговування лічильників, керування даними вимірювань тощо) покладається на операторів розподільних мереж (Distribution System Operator /DSO/). В окремих випадках, зокрема у Великобританії і Німеччині, ці обов'язки можуть брати на себе інші учасники ринку, наприклад, постачальники електроенергії або провайдери систем обліку [4].

В секторі керування даними вимірювань відбуваються зміни, які в першу чергу стосуються регуляторної політики. У таких країнах, як Австрія, Данія, Італія, Норвегія і Великобританія найближчим часом очікується на впровадження нових правил відповідно до змін у моделі керування даними вимірювань. Серед існуючих підходів до керування даними вимірювань в країнах ЄС слід відзначити три моделі [4]:

- **централізована**: передбачає наявність єдиної бази даних вимірювань в межах ринку електричної енергії, яка забезпечує стандартизацію, зберігання, захист даних та надання доступу до них учасникам ринку електричної енергії на визначених умовах;
- **децентралізована («точка-точка»)**: полягає у безпосередньому обміні даними вимірювань між заінтересованими учасниками ринку електричної енергії;
- **частково централізована модель**: передбачає наявність єдиного інформаційного центру, водночас не заперечуючи обмін даними вимірювань у децентралізованому порядку.

Централізована модель керування даними вимірювань використовується, зокрема, у Норвегії та Великій Британії. Перевагами такої моделі є:

- **ефективність витрат**: централізація забезпечує істотну економію в масштабі надання послуг зв'язку та оброблення даних;
- **покриття важкодоступних точок обліку**: централізація передбачає комплексні комунікаційні рішення, забезпечуючи повне розгортання системи;
- **безпеку даних**: централізована модель зв'язку поліпшує впровадження всебічних, послідовних та остаточних заходів безпеки;
- **інтелектуалізація мережі**: централізована модель забезпечує більш широкі можливості для розвитку інтелектуальних мереж з плином часу в порівнянні з альтернативними децентралізованими моделями побудови комунікаційних систем;
- **позагалузеві послуги за додаткову вартість**: уповноважений орган керування даними вимірювань обслуговує цілісну систему, розподілену в межах енергоринку. Це надає можливість пропонувати свої послуги іншим галузям промисловості за додаткову платню, тим самим компенсуючи витрати у секторі енергетики.

В той же час централізованій моделі властиві й певні виклики. Впровадження монополії у галузі, де послуги зв'язку мали б надаватися на ринкових засадах. Негативно впливати можуть такі фактори:

- потенційно вища вартість послуг з впровадження інформаційних систем за відсутності конкуренції;
- за відсутності тиску з боку конкурентів послуги регуляторного органу можуть не відповідати або не цілком відповідати реальним потребам споживачів;
- витрати на розробку додаткової нормативно-правової бази для забезпечення впорядкованого впровадження моделі;
- єдиний інформаційний центр з доступом до всіх точок обліку є концентрованим об'єктом хакерських атак.

Втім, переваги, що стосуються безпеки інформації, за централізованої моделі керування даними бачаться переконливішими.

Децентралізована модель керування даними вимірювань використовується, зокрема, в Іспанії. До переваг децентралізованої моделі можна віднести:

- **пропорційність**: в контексті іспанської двосторонньої децентралізованої моделі керування даними вимірювань, у поєднанні з регуляторними постановами, спостерігався розвиток бази даних DSO. Регуляторні норми є демократичнішими у порівнянні зі створенням в рамках централізованої моделі єдиної бази даних;

- *економічна ефективність*: перехід від існуючої децентралізованої моделі керування до централізованої, яка базується на створенні єдиної бази обміну та зберігання даних, розцінюється DSO, як занадто дорогою із сумнівною рентабельністю, в першу чергу, зважаючи на витрати, що пов'язані з впровадженням та налагодженням інформаційних систем;

- *ефективність керування*: двостороння модель керування даними вимірювань чітко окреслює власників та відповідальних за роботу баз даних. DSO несуть відповідальність за розробку баз даних, а також фінансують побудову інформаційних систем.

Найсуттєвим недоліком децентралізованої моделі є відсутність прозорості і потенційна заангажованість DSO, особливо у випадку їхньої вертикальної інтегрованості з постачальниками. Іспанський досвід свідчить про необхідність запровадження детального регулювання, що має унеможливити дискримінаційну діяльність DSO, які можуть заперечити або зробити доступ до даних більш важким для постачальників, що не входять до їх структури.

Частково децентралізований підхід застосовано в Бельгії. Загальний огляд моделей керування даними вимірювань в лібералізованих ринках електричної енергії країн ЄС наведено у таблиці 1 [5].

Таблиця 1 – Моделі керування даними вимірювань в лібералізованих ринках електричної енергії країн ЄС

Країна	Зона відповідальності								
	Керування приладами обліку				Керування даними вимірювань				
	Закупівля	Програм. Налашт. ж.	Інсталяція	Обслуговування	Зчитування	Обробл./ передавання	Зберігання	Перевірка	Отримання доступу
Австрія	Оператори мереж	Оператори мереж	Оператори мереж	Оператори мереж	Оператори мереж	CSA	DSO	CSA	Споживач; Постач-к.
Бельгія	DSO	DSO	DSO	DSO	DSO	Data hub ("Atrias")	DSO	Data hub ("Atrias")	Споживач; Постач-к.
Велика Британія	Постач-к; MAP; Оператори мереж	Постач-к; MOP; Оператори мереж	Постач-к; MOP; Оператори мереж	Постач-к; MOP; Оператори мереж	Data hub ("DCC"); Споживач	Data hub ("DCC");	Data hub ("DCC"); Споживач	Data hub ("DCC");	Оператори мереж; Постач-к
Іспанія	DSO; Постач-к	DSO; Постач-к	DSO; Постач-к	DSO; Постач-к	DSO; Споживач	DSO	DSO; Постачальник	DSO; Постачальник	Постач-к
Італія	Оператори мереж; Споживач	Оператори мереж	Оператори мереж	Оператори мереж	Оператори мереж	DSO; Постачальник	Оператори мереж; Постач-к	Оператори мереж; Постач-к	Постач-к; Споживач
Німеччина	DSO MOP	DSO MOP	DSO MOP	DSO MOP	MOP	MOP DSO	DSO	TSO; Постач-к	Постач-к; TSO; Споживач
Норвегія	DSO	DSO	DSO	DSO	DSO	Data hub ("Nubix")	Data hub ("Nubix")	Data hub ("Nubix")	Постач-к; Споживач

Європейська Рада Регуляторів Енергетики (The Council of European Energy Regulators /CEER/) стверджує, що інтелектуалізація вимірювань не має бути самоціллю, а скоріше має сприяти створенню ефективно функціонуючого і конкурентоспроможного енергетичних ринків та досягненню поставлених

на 2020 рік цілей, що стосуються сектору енергетики та екології, які затвержені у 3-му пакеті документів внутрішніх енергетичних ринків (3-rd Internal Energy Market Package) [6].

Сьогодні, коли в Україні відбувається поступовий перехід від Оптового ринку електроенергії (ОРЕ) за моделлю «пул» до РДЦБР, надзвичайно важливо забезпечити повноту, достовірність та актуальність даних обліку, що формуються на оптовому і роздрібному ринках електричної енергії України [3, 7].

На сучасному етапі автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) кожного суб'єкта ОРЕ за завданням регламентом здійснюють зчитування первинних даних з первинних баз даних (ПБД) приладів комерційного обліку електроенергії, що встановлені на території відповідного суб'єкта, їхнє оброблення, зокрема, приведення до межі балансової належності електричних мереж, агрегування, обмін первинними, обробленими та агрегованими даними у вигляді файлів-макетів із АСКОЕ суміжних суб'єктів ОРЕ з метою їхнього погодження та визначення результуючих значень сальдо перетікань електроенергії на межі балансової належності електричних мереж суміжних суб'єктів ОРЕ, і передавання агрегованих даних, зокрема, результуючих значень сальдо перетікань електроенергії на межі з кожним суб'єктом ОРЕ, до АСКОЕ Головного оператора (ГО) за допомогою уніфікованого протоколу передавання даних вимірювань (УПЦДВ) [8, 9] у вигляді попередньо визначених даних мережею передавання даних (МПД) ГО [10] або Інтернет (рис.1). Головними недоліками існуючої схеми обміну даними обліку електроенергії є [11]:

- відсутність (в загальному випадку) дистанційного автоматизованого доступу суб'єктів ОРЕ до ПБД приладів комерційного обліку електроенергії, що встановлені на території суміжних суб'єктів ОРЕ, з метою верифікації і валідації даних комерційного обліку, зокрема, на підставі результатів порівняння та аналізу достовірності первинних даних обліку;
- недосконалість файлів-макетів, що містять дані обліку електроенергії, зокрема, відсутність у файлах-макетах кодів якості (достовірності) даних комерційного обліку, застосування різних систем кодування даних у файлах макетах тощо;
- недосконалість процедури обміну файлами-макетами за допомогою електронної пошти, зокрема, відсутність гарантій щодо доставки електронної пошти, неможливість повторного запиту файлу-макету тощо;
- відсутність уніфікації під час обміну даними обліку електроенергії за допомогою файлів-макетів, зокрема, відсутність єдиних форматів файлів-макетів визначених типів (наприклад: *.txt, *.xls), відсутність єдиних форматів даних у файлах-макетах (наприклад: кВт*г, МВт*г), відсутність єдиних способів обміну файлами-макетами в ОРЕ України (наприклад: SMTP, FTP) тощо.

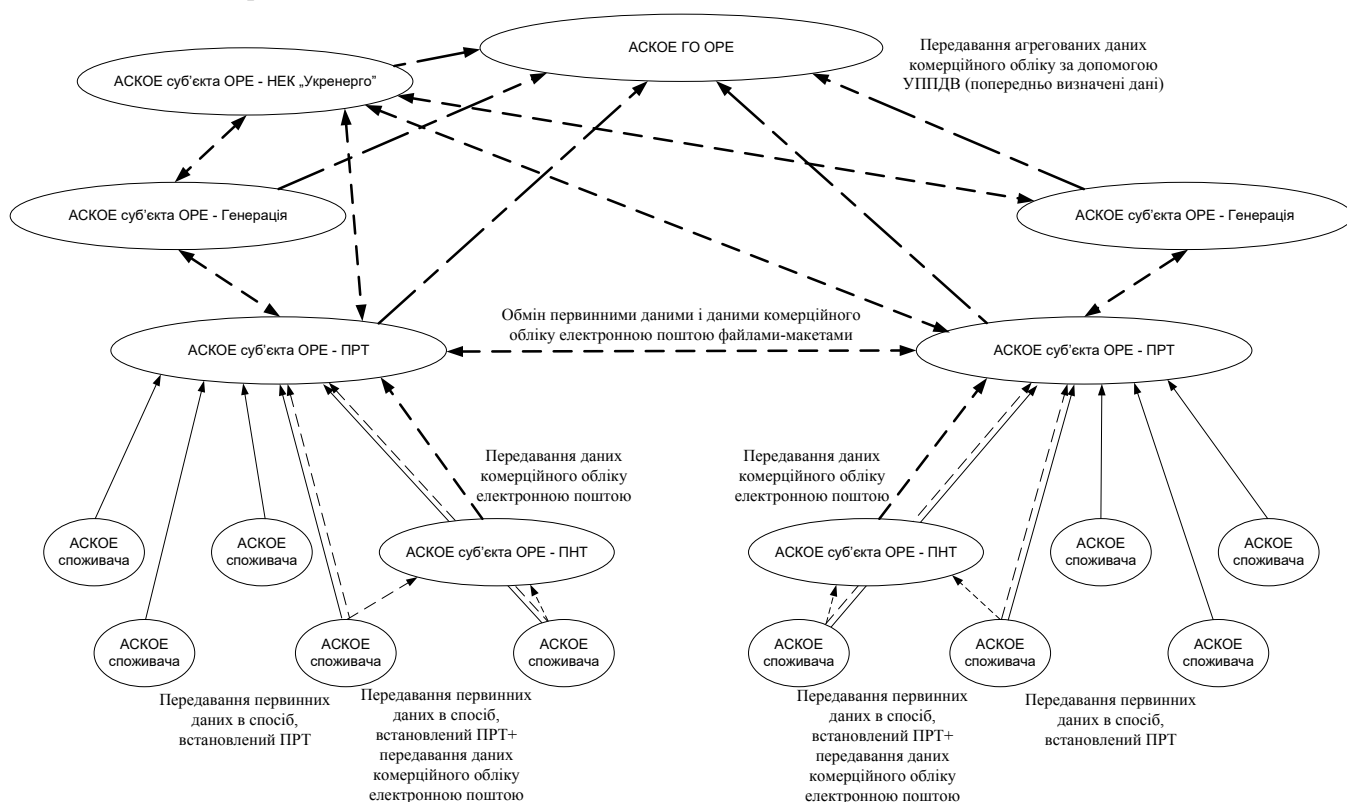


Рисунок 1 – Напрямки передавання даних від АСКОЕ суб'єктів ОРЕ до АСКОЕ ГО ОРЕ (поточний стан)

Вищенаведені недоліки не дозволяють повною мірою забезпечити проведення якісних розрахунків в ОРЕ України.

З метою забезпечення повноти, достовірності та актуальності даних комерційного обліку в ОРЕ України Головному оператору запропоновано поступове вдосконалення процедур обміну даними комерційного обліку електроенергії між АСКОЕ суб'єктів ОРЕ [11].

1. На першому кроці необхідно забезпечити передавання від АСКОЕ суб'єктів ОРЕ до АСКОЕ ГО ОРЕ разом з агрегованими даними комерційного обліку необроблених даних обліку (рис.2). Передавання необроблених даних обліку повинно здійснюватись за допомогою УППДВ у вигляді попередньо визначених даних. Передавання необроблених даних обліку має здійснюватись тими ж самими програмними та апаратними засобами АСКОЕ суб'єктів ОРЕ, що й передавання агрегованих даних комерційного обліку. Це дозволить уникнути додаткових витрат на розвиток АСКОЕ суб'єктів ОРЕ, зокрема, на розвиток ПЗ.

Створення актуальної бази необроблених даних обліку в уніфікованій базі даних (УБД) АСКОЕ ГО ОРЕ сприятиме підвищенню достовірності даних комерційного обліку електроенергії в АСКОЕ ОРЕ України, запобігатиме необгрунтованому заміщенню суб'єктами ОРЕ первинних даних обліку даними ручного завантаження та вже на початковому етапі дозволить Головному оператору здійснювати в ручному режимі вибірккову верифікацію даних комерційного обліку прямими методами на підставі необроблених даних.

Створення актуальної бази необроблених даних і даних комерційного обліку в УБД АСКОЕ ГО ОРЕ також дозволить забезпечити обмін необробленими даними і даними комерційного обліку між АСКОЕ суміжних суб'єктів ОРЕ в автоматизований спосіб засобами МПД за допомогою УППДВ або Web-інтерфейсу з метою їхньої верифікації та валідації (погодження). Це також сприятиме підвищенню достовірності даних комерційного обліку електроенергії в АСКОЕ ОРЕ України.

Одночасно Головним оператором повинна бути побудована та забезпечена підтримка цілісної й актуальної бази нормативних та довідкових даних щодо принципів схем електричних мереж, меж балансової належності та параметрів точок обліку АСКОЕ суб'єктів ОРЕ з метою забезпечення можливості регулярної верифікації даних комерційного обліку, що надходять від АСКОЕ суб'єктів ОРЕ, в АСКОЕ ГО ОРЕ в автоматизований спосіб прямими методами на підставі необроблених даних обліку.

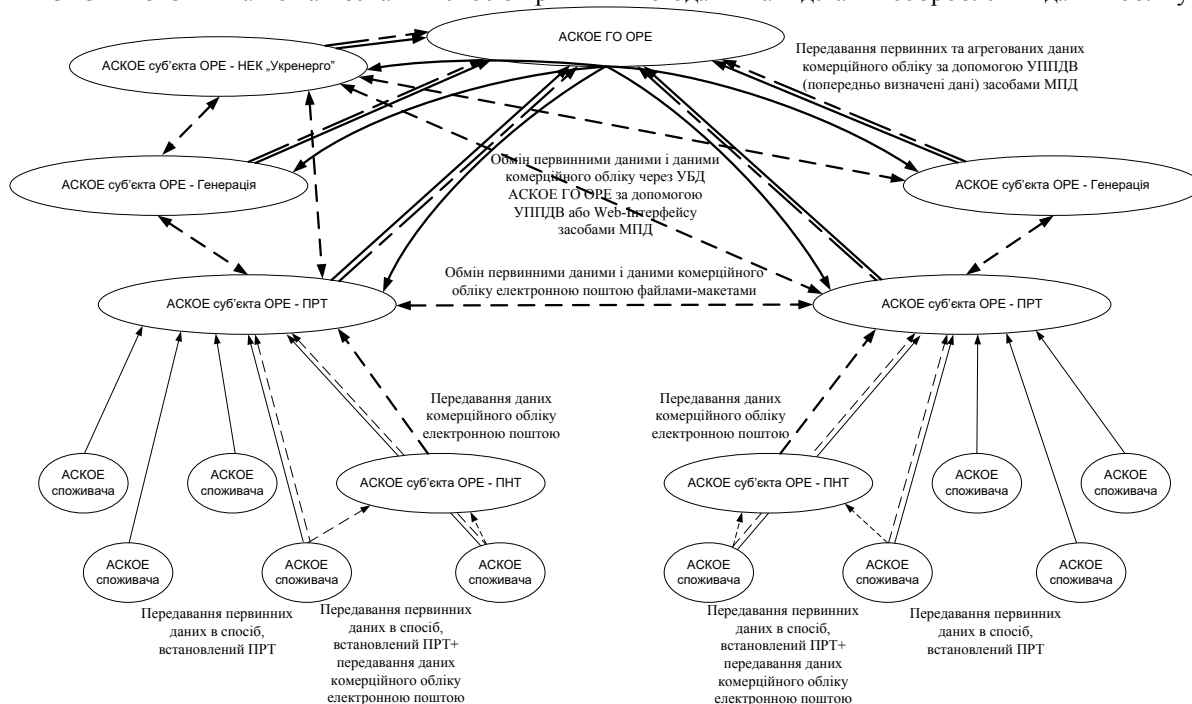


Рисунок 2 – Напрямки передавання даних від АСКОЕ суб'єктів ОРЕ до АСКОЕ ГО ОРЕ (перший крок)

2. На другому кроці необхідно забезпечити в АСКОЕ ОРЕ України можливість регламентованого (контрольованого) дистанційного доступу до ПБД приладів комерційного обліку електроенергії на межі ОРЕ України (рис.3). Такий доступ може здійснюватись Головним оператором або суміжними суб'єктами ОРЕ з метою верифікації необроблених даних обліку шляхом порівняння їх з первинними даними обліку, а також на підставі аналізу іншої інформації, що формується та зберігається приладами комерційного обліку електроенергії в точках обліку, а саме: показів інтегрованих годинників приладів комерційного обліку електроенергії, вмісту журналу коригувань часу інтегрованих годинників приладів комерційного обліку електроенергії, вмісту журналу подій приладів комерційного обліку електроенергії тощо.

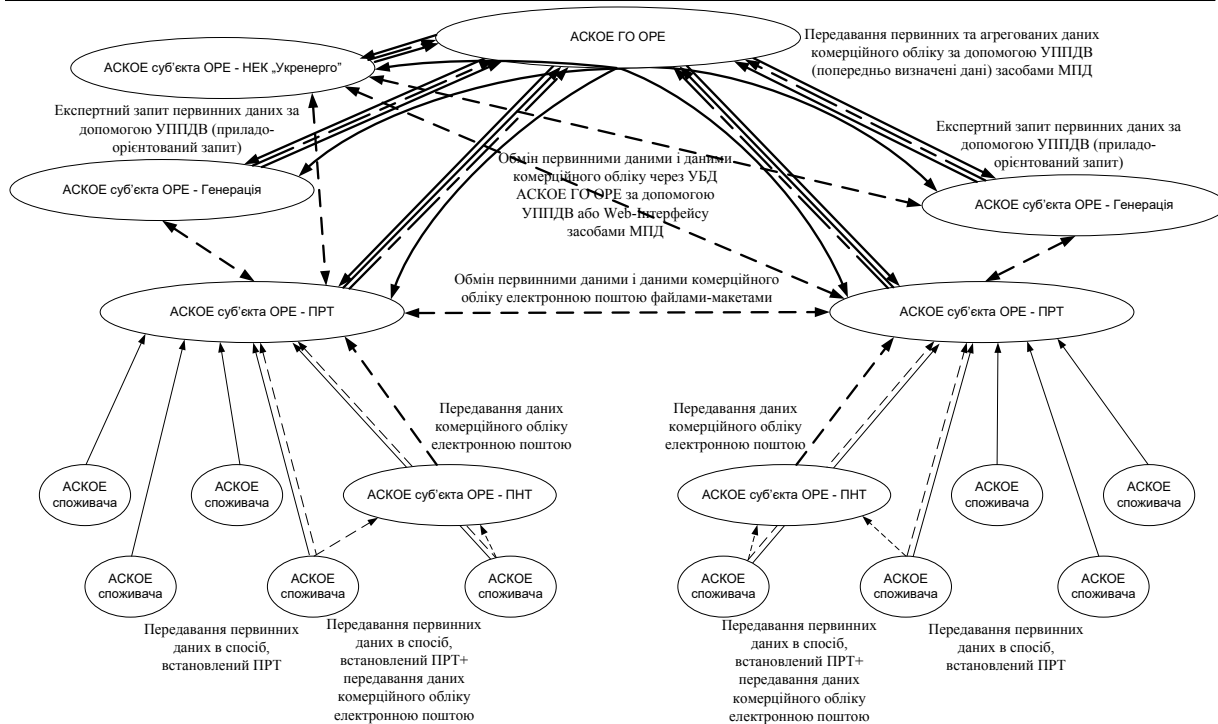


Рисунок 3 – Напрямки передавання даних від АСКОЕ суб'єктів OPE до АСКОЕ ГО OPE (другий крок)

Забезпечення регламентованого (контрольованого) дистанційного автоматизованого доступу до ПБД приладів комерційного обліку електроенергії може здійснюватися в один з наступних способів (рис.4):

- шляхом формування та надсилання до сервера АСКОЕ суб'єкта OPE приладо-орієнтованих запитів УППДВ;
- шляхом формування та надсилання до АСКОЕ об'єкту обліку суб'єкта OPE приладо-орієнтованих запитів УППДВ або запитів в форматі комунікаційного протоколу АСКОЕ суб'єкта OPE;
- шляхом формування та надсилання відповідних запитів безпосередньо до приладу комерційного обліку електроенергії за допомогою оригінального комунікаційного протоколу цього приладу.

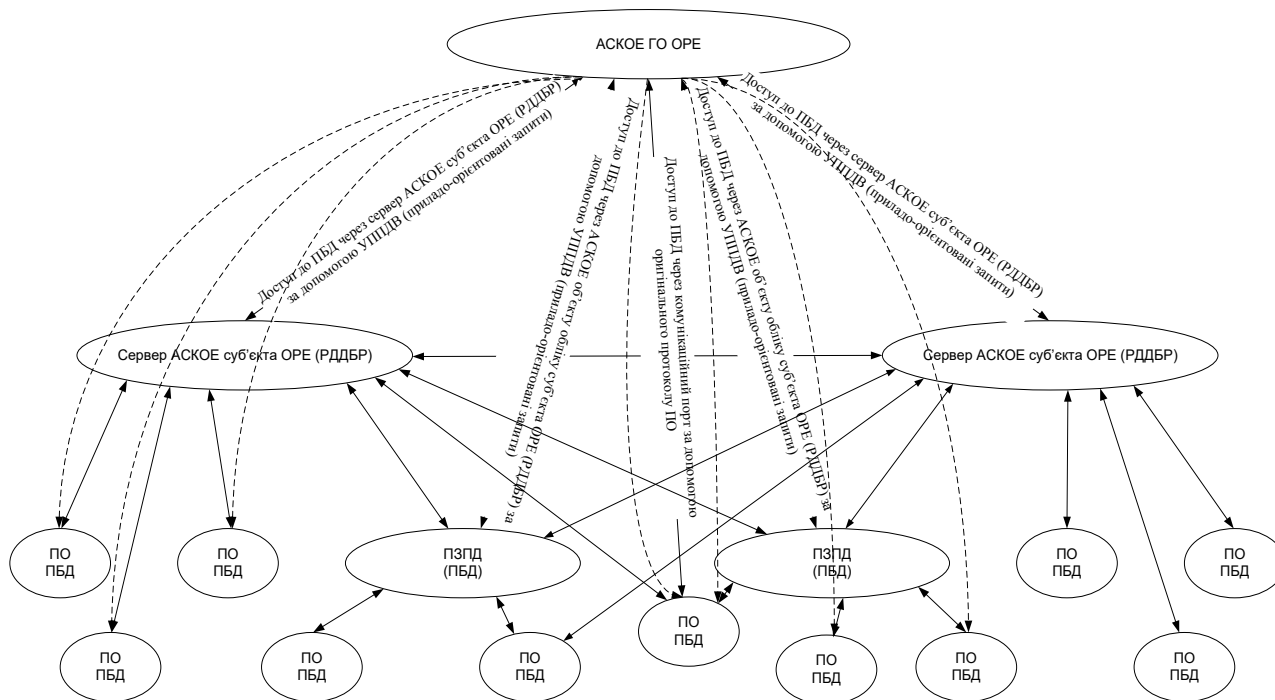


Рисунок 4 – Схема рівномірного дистанційного автоматизованого доступу суб'єктів OPE (РДДБР) до ПБД приладів обліку електроенергії

Для використання в АСКОЕ ГО ОРЕ рекомендується один з перших двох способів регламентованого (контрольованого) дистанційного автоматизованого доступу до ПБД приладів комерційного обліку електроенергії. Очікувані витрати – необхідність розвитку АСКОЕ суб'єктів ОРЕ з метою оброблення приладо-орієнтованих запитів УППДВ в серверах та пристроях збирання та передавання даних (ПЗПД), на базі яких утворюються АСКОЕ об'єктів обліку.

Забезпечення регламентованого (контрольованого) дистанційного автоматизованого доступу до ПБД приладів комерційного обліку електроенергії підвищить дисциплінованість суб'єктів ОРЕ під час формування та передавання даних комерційного обліку електроенергії та покращить якість й точність формування електроенергетичного балансу в ОРЕ України через своєчасне виявлення та заміщення недостовірних первинних даних обліку електроенергії.

3. В умовах РДДБР вимоги щодо передавання попередньо визначених необроблених даних та даних комерційного обліку електроенергії до АСКОЕ ГО ОРЕ, а також забезпечення регламентованого (контрольованого) дистанційного автоматизованого доступу до ПБД приладів комерційного обліку електроенергії засобами МПД за допомогою УППДВ повинні бути розповсюджені на всіх суб'єктах РДДБР (рис.5). Крім того необхідно забезпечити автоматизований обмін попередньо визначеними необробленими даними і даними комерційного обліку електроенергії безпосередньо між АСКОЕ суб'єктів РДДБР засобами МПД за допомогою УППДВ. Це дозволить оперативно узгоджувати обсяги купівлі/продажу електроенергії між виробниками та кваліфікованими споживачами – суб'єктами РДДБР, а також визначати значення сальдо перетікань електричної енергії між суб'єктами РДДБР та операторами електричних мереж (DSO).

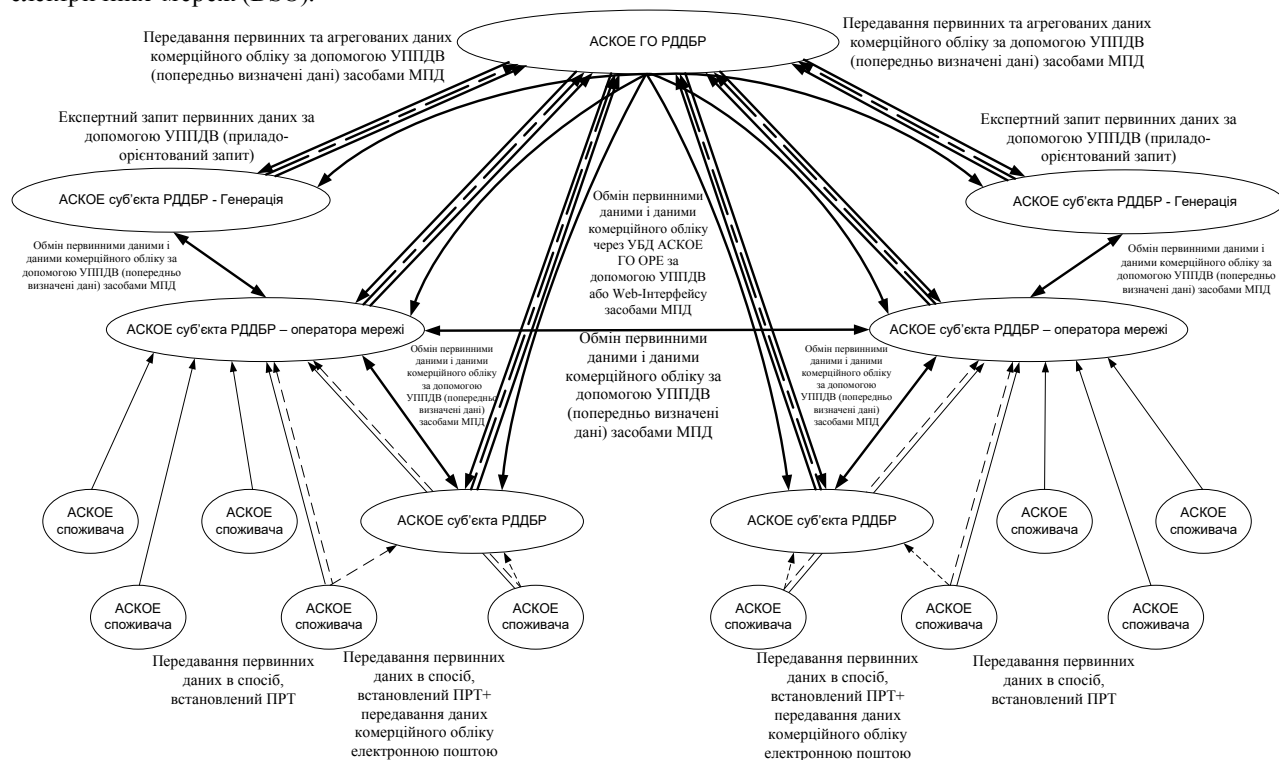


Рисунок 5 – Напрямки обміну даними між АСКОЕ суб'єктів РДДБР і АСКОЕ ГО РДДБР

Висновки

В результаті виконання запропонованих дій очікується на створення розподіленої бази даних обліку, яка охоплює первинні дані обліку, що містяться в ПБД приладів комерційного обліку електроенергії, необроблені дані та дані комерційного обліку, що доступні всім заінтересованим сторонам в режимі он-лайн. Це забезпечить створення умов для проведення якісних розрахунків за електричну енергію на підставі повних, достовірних та актуальних даних обліку, як за існуючої моделі ОРЕ, так і в РДДБР і на перехідних етапах.

Список літератури:

1. Про засади функціонування ринку електричної енергії України: закон України [прийнято Верхов. Радою 24.10.2013 р. № 663-VII, поточна редакція від 20.04.2014] // Відомості Верховної Ради України, 2014 – № 22 – с.1781.
2. КЕМА: Smart meter test laboratories. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.dnvkema.com/es/innovations/innovative-projects/Smartgrid/Smart-meter-test-laboratories.aspx>

3. Коцар О.В. Комплексне забезпечення достовірності та актуальності даних комерційного обліку в умовах запровадження в Україні ринку двохсторонніх договорів і балансуючого ринку // Енерг. та електрифікація, 2011. - №3 - С.27 - 39.

4. CEER Benchmarking Report on Meter Data Management. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.energy-regulators.eu>

5. Світовий досвід організації збору та обробки даних комерційного обліку в лібералізованих ринках електричної енергії / Д.К.Ткаченко, студент, О.В.Коцар, канд.техн.наук, доцент // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина – 2014», 21-23 травня 2014 року – Київ, ІЕЕ НТУУ «КПІ» - С. 79 – 88.

6. 3rd Internal Energy Market Package. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://ec.europa.eu/energy/gas_electricity/legislation/legislation_en.htm

7. Коцар О.В., Поліщук О.Ю. Практичні аспекти побудови та експлуатації АСКОВ кінцевих споживачів // Енерг. та електрифікація, 2013. – №6 – С.53 – 64.

8. Унифицированный протокол передачи данных АСКУЭ Головного оператора ОПЭ. Спецификация. Версия протокола 1.0. Версия документа 1.1.3.1 / Разраб. О.В.Коцар, В.В.Мазан – К.: 2003 – 2006 – 65 с – Режим доступу до ресурсу: <http://www.er.gov.ua/doc.php?c=13&wid=91be95c2e3479e0eb4da444ae693e28a>.

9. Коцар О.В., Мазан В.В. Применение унифицированного протокола передачи данных коммерческого учета электрической энергии в АСКУЭ Головного оператора ОПЭ Украины // Энерг. и электрификация, 2005. - №2 - С.2-9.

10. Концепція побудови мережі передачі даних Головного оператора комерційного обліку електричної енергії оптового ринку електроенергії України. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.er.gov.ua/data/KonceptMPD.v4.rar>

11. Концепція Інформаційно-обчислювального комплексу Головного оператора Системи комерційного обліку Оптового ринку електроенергії України / Розроб.: А.В.Праховник – керівн. розроб., О.В.Коцар, Ю.О.Расько // Затв. ДП «Енергоринок» 10.11.2011р. – 68 с.

O. Kotsar, D. Tkachenko

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

METERING DATA MANAGEMENT ARE IN THE CONDITIONS OF INTRODUCTION IN UKRAINE THE LIBERALIZED ELECTRICITY MARKET

Abstract. *In the article were investigated the aims, tasks and models of metering data management are in the conditions of introduction of the liberalized electricity market in Ukraine. On the basis of analysis results of functioning of the automated systems for control, metering and energy using management (ASCMM), which are owned by electricity market players, a conclusion is done, that effective introduction of Bilateral Contracts Market and Balancing Market (BCM&BM) is possible only on condition of build of steady model of metering data management at the different models of Ukrainian electricity market and on the transitional stages. As a result of analysis of world experience of application of different models of metering data management a conclusion is done in relation to expedience of introduction in Ukraine of the centralized model, which creates the best terms for providing of plenitude, authenticity and actuality of metering data. The row of organizational and technical measures and certainly basic stages is offered for transition from decentralize to the centralized metering data management model in the Ukrainian electricity market by perfections of data exchange between ASCMM of electricity market players and Information-Computer Complex (ICC) of the Main Operator, build of the distributed database of electric energy measurings and metering providing of the regulated controlled from distance automated access of all of the interested players to information of metering data, in particular to primary metering data in a compatible method on equal in rights principles.*

Keywords: measuring, metering data for billing, data management, meter, primary database, primary metering data, electricity market, compatible protocol for transmission of metering data.

References

1. About the base principles of electricity market functioning in Ukraine: Law of Ukraine [accepted by Verkhovna Rada 24.10.2013 # 663-VII, current edition from 20.04.2014] // Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny, 2014 – # 22 – p.1781.

2. KEMA: Smart meter test laboratories. [Electronic resource] – The mode for access to the resource: <http://www.dnvkema.com/es/innovations/innovative-projects/Smartgrid/Smart-meter-test-laboratories.aspx>

3. Kotsar O. The complex providing of authenticity and actuality of metering data are in the conditions of introduction in Ukraine the Bilateral Contracts Market and Balancing Market // Energetyka ta Elektrifikatsia, 2011. - #3 - P.27 – 39.

4. CEER Benchmarking Report on Meter Data Management. [Electronic resource] – The mode for access to the resource: <http://www.energy-regulators.eu>

5. World wide experience of organization of metering data collection and processing for billing in the liberalized electricity markets / D. Tkachenko, student, O.Kotsar, Ph.D, Assoc. Prof. // VI International Scientific and Technical conference «Energetic. Ecology. Person – 2014», 21-23 of May, 2014 – Kyiv, IEE NTUU «KPI» - P. 79 – 88.
6. 3rd Internal Energy Market Package. [Electronic resource] – The mode for access to the resource: http://ec.europa.eu/energy/gas_electricity/legislation/legislation_en.htm
7. Kotsar O., Polischuk O. Practical aspects of build and exploitation the ASCMM of final consumers // Energetyka ta Elektryfikatsia, 2013. – #6 – P.53 – 64.
8. Compatible Protocol for Data Transmission to ASCMM of Main Operator of Wholesale Electricity Market of Ukraine . Specification. Protocol version 1.0. Paper version 1.1.3.1 / Develop. O.Kotsar, V.Mazan – K.: 2003 – 2006 – 65 p.p. [Electronic resource] – The mode for access to the resource: <http://www.er.gov.ua/doc.php?c=13&wid=91be95c2e3479e0eb4da444ae693e28a>.
9. Kotsar O., Mazan V. Application of Compatible Protocol for Metering Data Transmissions to ASCMM of Main Operator of Wholesale Electricity Market of Ukraine // Energetyka ta Elektryfikatsia, 2005. - #2 - P.2-9.
10. Conception of Build of the Telecommunications Network of Main Operator of Commercial Metering of Electric Energy of Wholesale Electricity Market of Ukraine. [Electronic resource] – The mode for access to the resource: http://www.er.gov.ua/data/KoncepcMPD_v4.rar
11. Conception of the Information-Computer Complex of Main Operator of Commercial Metering of Electric Energy of Wholesale Electricity Market of Ukraine. / Develop.: A.Prakhovnyk – main manag. of develop., O.Kotsar, Y.Rasko // Ratif. Of St.Ent. «Energorynok» 10.11.2011 – 68 p.p.

УДК 621.317

О.В. Коцарь, канд. техн. наук, доцент, **Д.К. Ткаченко**

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
УПРАВЛЕНИЕ ДАННЫМИ УЧЕТА В УСЛОВИЯХ ВНЕДРЕНИЯ В УКРАИНЕ
ЛИБЕРАЛИЗОВАННОГО РЫНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

***Аннотация.** В статье исследованы цели, задачи и модели управления данными учета в условиях внедрения в Украине либерализованного рынка электрической энергии. На основании анализа результатов функционирования автоматизированных систем контроля, учета и управления энергоиспользованием (АСКУЭ) субъектов энергорынка сделан вывод о том, что эффективное внедрение рынка двухсторонних договоров и балансирующего рынка (РДДБР) возможно лишь при условии построения устойчивой модели управления данными учета при различных моделях рынка электрической энергии Украины и на переходных этапах. На основании результатов анализа мирового опыта применения различных моделей управления данными измерений сделан вывод относительно целесообразности внедрения в Украине централизованной модели, которая создает наилучшие условия для обеспечения полноты, достоверности и актуальности данных учета. Предложен ряд организационно-технических мероприятий и определены основные этапы перехода от децентрализованной к централизованной модели управления данными учета на рынке электрической энергии Украины путем совершенствования взаимодействия АСКОВ субъектов энергорынка и информационно-вычислительного комплекса (ИВК) Главного оператора, построение распределенной базы данных измерений и учета электрической энергии и обеспечения регламентированного дистанционного автоматизированного доступа всех заинтересованных сторон к данным учета электрической энергии, в частности к первичным данным учета унифицированным способом на принципах хранилища.*

***Ключевые слова:** измерение, данные коммерческого учета, первичная база данных, первичные данные учета, рынок электрической энергии, унифицированный протокол передачи данных измерений, управление данными, учет.*

Надійшла 28.06.2015

Received 28.06.2015

О. Л. Котляров, канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник
Інститут загальної енергетики НАН України

ЗАСОБИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ МОДЕРНІЗАЦІЇ НАФТОГАЗОВИХ ПРОМИСЛІВ

Запропоновано метод багатофакторного оцінювання альтернатив певної інноваційної технології (устаткування) для їх порівняння, ранжирування і вибору кращих в умовах, коли частина показників ефективності альтернатив (чи навіть всі) можуть бути нечіткими. Метод базується на лінійному програмуванні, показники ефективності впливають на результати розрахунків через цільову функцію та обмеження. Оптимальний варіант ранжирування альтернатив відшукується шляхом штучного створення та поступового посилення конкуренції між ними, в якій кожна альтернатива «аргументує» повним набором своїх показників. Сутність запропонованого методу пояснюється на прикладі альтернатив свердловинного насосного агрегату для відбору пластової рідини.

Розроблено математичну модель та її реалізацію в MS Excel, які дозволяють керівній особі, що приймає остаточне рішення, але не має спеціальних знань, стати провідним учасником процесу вибору кращих новітніх технологій і свідомо зробити свій власний вибір. Задача розв'язана аналітично, наведено розрахункові залежності для практичного застосування моделі, яке пояснюється конкретними прикладами.

Модель може застосовуватись для багатокритеріального порівняння і ранжирування будь-яких однакових за призначенням об'єктів з відомими показниками ефективності (корисності), зокрема, при виборі кращого варіанта інноваційно-інвестиційного проекту.

Ключові слова: інноваційні технології, багатофакторний вибір, математична модель, лінійне програмування

Вступ. Типовими для підготовчої стадії модернізації нафтогазовидобувного підприємства є питання визначення інвестиційної привабливості різних варіантів (альтернатив) сучасних інноваційних технологій чи устаткування для включення кращих із них в інноваційно-інвестиційні проекти, самих цих проектів, а також окремих родовищ. Інакше кажучи, виникає задача вибору кращих серед означених об'єктів за їхньою виробничою ефективністю. Традиційним (майже «нормативним») підходом в таких ситуаціях є порівняння та ранжирування альтернатив тільки за одним показником ефективності, який вважають головним, всі ж інші показники мають бути лише «не гірше, ніж...». Проте очевидно, що для найбільш економічного і технічно результативного вкладання інвестицій потрібний «тонкий» підхід, здатний комплексно врахувати повну сукупність показників ефективності порівнюваних об'єктів. Тут виникають специфічні проблеми загального характеру, на розв'язання яких націлені розроблені в даній роботі засоби підтримки прийняття рішень.

Сутність цих проблем розглянемо на прикладі вибору кращих альтернатив свердловинного насосного агрегату (НА). Виробнича ефективність НА характеризується багатьма показниками [1, 2]. Зокрема, основні технологічні показники – подача, глибина відбору нафти тощо – задаються своїми максимальними значеннями або ж інтервалами значень, а гідравлічна характеристика задається графічно. Важливою при виборі може бути і чисто якісна інформація, наприклад, щодо екологічності чи простоти та надійності агрегату.

Таким чином, узагальнюючи, можна сказати, що серед показників ефективності НА – техніко-технологічних, економічних, екологічних тощо – можуть бути чіткі числові дані, задані одним числом, нечіткі числові інтервальні чи графічні дані, а також якісні характеристики. Задача полягає в тому, щоб комплексно (багатокритеріально) порівняти і ранжувати альтернативи НА за всією сукупністю цих показників. Для цього можна використати різноманітні спеціальні методи (див., наприклад, [3 – 5]), пристосовані для розгляду ситуацій *суперечності показників*, коли за деякими показниками одні альтернативи є кращими, за іншими – інші, і тому комплексне ранжирування всіх альтернатив є невизначеним. Ця невизначеність є принциповою, і в таких ситуаціях потрібна додаткова інформація. Найчастіше вона зводиться до надання особою, що приймає рішення (ОПР), кожному із суперечливих показників певної відносної ваги (пріоритетності), яка відображає її суб'єктивні переваги.

Проте в даній задачі є ще одна проблема, пов'язана з тим, що ОПР, як правило, не має вузьких спеціальних знань щодо конкретних технологій і тому не має певних орієнтирів при виборі кращих із них. З іншого боку, ОПР може мати власне глобальне бачення проблеми, а також несе всю відповідальність за остаточний вибір. Щоб допомогти ОПР самостійно зробити свій власний вибір після консультацій з

експертами, застосовуються різноманітні, переважно, інтерактивні методи підтримки прийняття рішень (див., наприклад, [4, 5]).

Постановка завдання. Доволі значна на даний час кількість таких методів пояснюється тим, що кожен із них має свої переваги й недоліки. Звідси випливає, що чим більшою є ця кількість, тим легше для кожної конкретної задачі підібрати найбільш адекватний метод. В роботі ставилась задача створення ще одного такого підходу для розв'язання означених вище питань модернізації нафтогазових промислів. Проте розроблені засоби мають загальний характер і можуть використовуватись, в принципі, для комплексного порівняння і ранжирування будь-яких однакових чи близьких за призначенням об'єктів із відомими показниками ефективності (корисності).

Далі вживаються терміни: *рейтинг* – ряд об'єктів різної величини або ж «якості», упорядкований в напрямі її зменшення; *ранг* – порядковий номер об'єкта у рейтингу.

Матеріали і результати досліджень. Математична модель має ієрархічну структуру і базується на комплексному оцінюванні альтернатив та створенні конкуренції між ними засобами лінійного програмування.

Розглянемо задачу лінійного програмування:

$$\sum_{n=1}^N C_n K_n \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$0 \leq K_n \leq K_{nb}, \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N K_n = 1. \quad (3)$$

Тут n – номер альтернативи; N – кількість альтернатив; коефіцієнти C_n в (1) та верхні межі K_{nb} в (2) – задані параметри кожної альтернативи; K_n – шукані безрозмірні величини.

Згідно (1) – (3) зі збільшенням параметрів C_n і K_{nb} певної альтернативи розрахункова величина K_n для неї теж зростає. Зробимо ці параметри залежними від показників ефективності альтернатив, і щоб із поліпшенням показників ці параметри зростали. За таких умов величина K_n для кожної альтернативи буде обрховуватись з огляду на повну сукупність її показників і зростати з поліпшенням кожного показника, тому K_n можна буде вважати *комплексною оцінкою* (за інтервальною шкалою) ефективності альтернативи за всіма її показниками, а ранжировані за їх величиною компоненти оптимального плану K_1, K_2, \dots, K_N – багатofакторним рейтингом альтернатив за ефективністю.

Верхні межі в (2) визначаємо залежностями:

$$K_{nb} = m\gamma_n, \quad m \geq 1, \quad (4)$$

$$\gamma_n = \frac{C_n \beta_n}{\sum_n C_n \beta_n}; \quad \sum \gamma_n = 1, \quad (5)$$

в яких є два нові параметри: m і β_n . Їхнє призначення пояснюється далі.

Нехай A – чіткий числовий показник, який бажано максимізувати, а B – мінімізувати. За окремими показниками цих двох типів альтернативи оцінюємо частинними оцінками (критеріями), відповідно, A_n/A_{\max} та B_{\min}/B_n , де A_{\max} , B_{\min} – максимальне та мінімальне значення показника у групі альтернатив. Якщо ж показник є нечітким і має експертну оцінку k_n , то його частинною оцінкою є k_n/k_{\max} . Із поліпшенням окремих показників певної альтернативи відповідні частинні оцінки її зростають.

Далі всі показники ефективності розбиваємо на головні та другорядні. Припустимо, нам відомі відповідні комплексні оцінки K_{gn} і K_{dn} альтернатив за показниками кожної з цих двох груп. Тоді для коефіцієнтів C_n і параметрів β_n в (1), (5) приймаємо

$$C_n = K_{gn}, \quad \beta_n = K_{dn} \quad (6)$$

і отримуємо двокритеріальну задачу (1) – (6) із двома заданими комплексними критеріями C_n, β_n , в якій коефіцієнти C_n реалізують вплив головних, а параметри β_n – другорядних показників на комплексне ранжирування альтернатив за всіма показниками.

Якщо в кожній з означених двох груп показники між собою є приблизно рівнозначними, то комплексні оцінки K_{gn} і K_{dn} альтернатив знаходимо як добуток відповідних частинних оцінок. Якщо ж хоча б в одній групі показники між собою нерівнозначні, то відповідну комплексну оцінку отримуємо ієрархічним шляхом, який наводиться нижче.

Практичне застосування моделі здійснюється таким чином. Із групи альтернатив, що розглядається, спершу доцільно виділити множину Парето [3, 4] лише домігантних альтернатив із суперечливими показниками, після чого їхнє комплексне ранжирування визначити за їхніми оцінками K_n . Оптимальний варіант ранжирування ОПР шукає шляхом поступового збільшення параметра m в (4), візуалізації

залежностей оцінок K_n від m і аналізу та порівняння ходу кривих $K_n(m)$. Ці криві для задачі (1) – (6) можна отримати в MS Excel за допомогою процедури Solver. Проте точно встановити їхні загальні властивості при довільному N можна лише аналітичним шляхом, який показує таке.

Занумеруємо альтернативи в порядку зменшення коефіцієнтів C_n . Із (4), (5) випливає, що

$$\sum_{n=1}^N K_{nB} = m \geq 1, \quad (7)$$

тобто параметр m показує, у скільки разів сума всіх верхніх меж перевищує суму оцінок K_n , яка, згідно (3), дорівнює одиниці. При $m = 1$, коли за (3), (7) $\sum K_n = \sum K_{nB}$, всі альтернативи отримують свої максимальні для даного m оцінки ($K_n = K_{nB}$). Але при $m > 1$ мають бути альтернативи з $K_n < K_{nB}$, оскільки тут виконується нерівність $\sum K_n < \sum K_{nB}$, яка посилюється зі зростанням m . Через це зі зростанням m виникає і поступово посилюється конкуренція між альтернативами, в якій кожна альтернатива «аргументує» повним набором своїх показників.

Однак умова (1) надає перевагу конкурентам із більшими коефіцієнтами C_n , яка, згідно з (4), (5), додатково підсилюється залежністю верхніх меж від цих коефіцієнтів, що зростає зі збільшенням C_n і m . Можна показати, що при m трохи більшому за одиницю альтернатива N , яка має найменший C_n , отримує залишок від розподілу оцінок між «старшими» $N - 1$ альтернативами, і її оцінка K_N стає меншою від $m\gamma_N$ на величину $m - 1$, а оцінки «старших» альтернатив, як і раніше, дорівнюють їхнім верхнім межах $m\gamma_n$. Тому зі зростанням m оцінки «старших» альтернатив лінійно зростають, а оцінка «аутсайдера» N лінійно спадає і при деякому $m = m_{0N}$ стає рівною нулю. Після цього він вибуває з конкурентної боротьби, і розмірність задачі зменшується на 1. При $m > m_{0N}$ новим «аутсайдером» серед решти $N - 1$ конкурентів стає альтернатива $N - 1$ із найменшим C_n . Оцінка K_{N-1} цієї альтернативи в точці m_{0N} є максимальною, а далі зі зростанням m починає лінійно спадати, і все повторюється вже для цієї зменшеної сукупності альтернатив. Нарешті з усіх конкурентів лишається тільки перша альтернатива з оцінкою $K_1 = 1$ (див. нижче рис. 1, де $N = 5$).

Звідси видно, що до статусу «аутсайдера» послідовно переходять всі альтернативи, крім першої. Якщо лишилось s конкурентів, то $s - 1$ «старших» оцінюються за виразом (4), а «аутсайдер» має оцінку $K_s = 1 - m$

$\sum_{n=1}^{s-1} \gamma_n$, яка зі зростанням m зменшується за законом

$$K_s = 1 - m/m_{0s}, \quad m_{0s} = \left(\sum_{n=1}^{s-1} \gamma_n \right)^{-1} \quad (8)$$

і стає рівною нулю в точці m_{0s} . В загальному випадку криві $K_n(m)$, $n = \overline{2, N-1}$, є ламаними лініями, що включають лінію зростання за законом $K_n = m\gamma_n$ і з максимумом в точці $m_{n\max} = m_{0(n+1)}$ та лінію спадання за законом (8). Крива $K_N(m)$ має лише лінію спадання з $m_{N\max} = 1$, а крива $K_1(m)$ – лінію зростання і «полку» $K_1 = 1$ при $m \geq m_{02}$. Лінії зростання між собою не перетинаються, а точки перетину у них є лише із лініями спадання «аутсайдерів».

Отже, при довільному m альтернативи поділяються на «старших» із оцінкою $K_n = m\gamma_n$, «аутсайдера» з оцінкою (8) і «менших» з оцінкою $K_n(m) = 0$. Нехай R_{en} – ранг альтернативи n за її ефективністю. Для «менших» альтернатив він дорівнює номеру n альтернативи, тобто її рангу за величиною коефіцієнта C_n ; для «старших» він збігається з рангом альтернативи за величиною її верхньої межі, тобто, згідно (4), (5), за величиною добутку $C_n\beta_n$; для «аутсайдера» визначається його поточною оцінкою K_n .

Таким чином, при $m = 1$, коли для всіх альтернатив $K_n = \gamma_n$, вплив коефіцієнтів C_n (головних показників) та параметрів β_n (другорядних показників) на комплексне ранжирування є симетричним, тобто однаковим. При $m > 1$ це стосується лише «старших» альтернатив з $K_n = m\gamma_n$, причому зі зростанням m з'являється і далі поступово зростає частка альтернатив, ранги R_{en} яких дорівнюють їх рангу n за коефіцієнтом C_n і не залежать від другорядних показників. Нарешті, при m більшому за деяке межове значення, яке позначимо через m_c , такими стають всі альтернативи. Звідси випливає, що параметр m визначає відносну вагомість впливу головних показників на комплексне ранжирування, зростання якої виявляється у збільшенні частки альтернатив з $R_{en} = n$.

Дії ОПР пояснює приклад тестових розрахунків за формулами (4), (5), (8) при $N = 5$ і відомих значеннях C_n , β_n . Вихідні дані та основні отримані результати містить табл. 1, а хід кривих $K_n(m)$ ілюструє рис. 1. Межова точка m_c в загальному випадку є абсцисою точки перетину лінії зростання і лінії спадання. Для даних з табл. 1 це лінії $K_1 = m\gamma_1$ і $K_2 = 1 - m\gamma_1$. Звідси: $m_c = (2\gamma_1)^{-1} = 3,205$; $m_{02} = \gamma_1^{-1} = 2 m_c = 6,410$. Позначимо: δ_c – частка альтернатив із $R_{en} = n$; w_c – відносне (порівняно з початковою однаковою вагомістю C_n і β_n при $m = 1$) зростання вагомості впливу коефіцієнтів C_n на комплексні оцінки K_n . Обидві величини залежать від m . Величина δ_c зростає стрибком на $1/(N - 1)$ в тих точках осі абсцис, де лінія чергового «аутсайдера» востаннє перетинає лінію,

що зростає. Для даного прикладу це абсиси точок перетину кривої 1 з кривими 5, 4, 3, 2 (див. рис. 1), і у кожній з них δ_c зростає на 1/4. Для величини w_c , яка є неперервною функцією m , прийемо, що в означених точках вона дорівнює $\delta_c(m + 0)$ і має значення, відповідно, 1/4, 1/2, 3/4 і 1, а у проміжках між сусідніми такими точками зростає рівномірно (лінійно). Виходячи з цього та зі свого розуміння переважної вагомості коефіцієнтів C_n , ОПР спочатку обирає відповідний проміжок, а далі всередині нього визначає свій оптимальний варіант комплексного ранжирування альтернатив за їх оцінками K_n .

Зауважимо, що результати розрахунків, подані на рис. 1, повністю збігаються із розв'язком задачі (1) – (5) за процедурою Solver, якщо його отримано за наведеними в табл. 1 характерними точками кривих, знайденими попередньо аналітичним шляхом. Якщо ж Solver застосовувати для розрахунків при довільних m , то розбіжність графіків $K_n(m)$, отриманих обома способами, може бути дуже помітною.

Таблиця 1 - Вихідні дані та результати розрахунків характерних точок кривих $K_n(m)$

№г	C_n/C_m ax	β_n/β_m ax	γ	m_{0n}	$m_{n \max}$	$K_{n\max}$
1	1,000	0,435	0,156	–	–	–
2	0,834	0,613	0,184	6,410	2,942	0,540
3	0,731	0,775	0,203	2,942	1,841	0,374
4	0,652	0,964	0,226	1,841	1,300	0,294
5	0,643	1,000	0,231	1,300	1,000	0,231

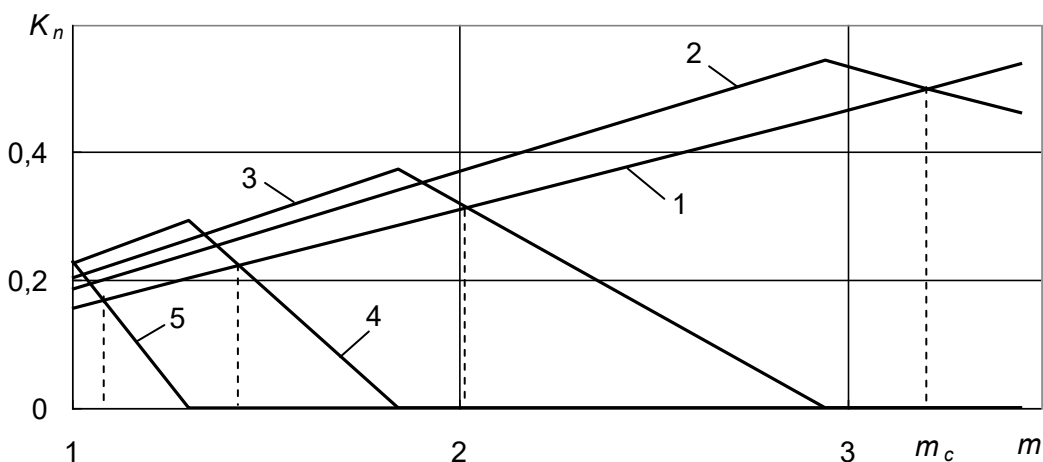


Рисунок 1– Залежність комплексних оцінок ефективності альтернатив від параметра m . Тут: номер кривої є номером альтернативи; пунктиром нанесені лінії проекції, що визначають точки зростання величини δ_c .

Ієрархічний спосіб визначення параметрів C_n, β_n за (6) пояснимо на прикладі вибору кращих насосних агрегатів. Нехай головними показниками НА обрано максимальні значення подачі G і глибини відбору нафти H , а другорядними – пов'язані з даною альтернативою інвестиційні I та експлуатаційні V витрати. Нехай, також, серед головних більш пріоритетним є показник H , а обидва другорядні показники є приблизно рівнозначними, і тому у (6) оцінка $K_{дн} = II_{\max} V/V_{\max}$. Для визначення оцінок K_m переходимо на другий (нижчий) рівень ієрархії, де головним вважаємо показник H , другорядним – G , і потім для даного рівня знаходимо $K_{2гн} = H/H_{\max}$ і $K_{2дн} = G_n/G_{\max}$. Після цього на другому рівні застосовуємо наведену вище методику дій ОПР, приймаючи аналогічно (6) $C_{2n} = K_{2гн}, \beta_{2n} = K_{2дн}$, і отримуємо в результаті комплексні оцінки $K_{гн}$ основного рівня в (6).

Звичайно, в загальному випадку може виникнути необхідність переходу на більш низькі рівні ієрархії, але завжди ми вийдемо на якийсь нижній рівень, де в кожній групі показників буде або лише один показник, або кілька між собою рівнозначних, і тому із визначенням комплексних оцінок кожної групи тут проблем не буде. Після розв'язання задачі на цьому рівні стає визначеною і розв'язується задача комплексного оцінювання на наступному вищому рівні. Так поступово рухаємось вгору до основного рівня, як це було показано в наведеному вище прикладі.

Наведемо деякі властивості моделі (крім зазначених вище):

- якщо при порівнянні двох альтернатив одна домінує іншу за всіма показниками, то її оцінка K_n є більшою;

- якщо при порівнянні двох альтернатив одна домінує іншу за параметрами C_n, β_n , то її оцінка K_n є більшою;
- при змінах параметрів C_n, β_n (одного з них чи обох) окремої альтернативи її оцінка K_n змінюється у тому ж напрямі;
- якщо ці параметри пропорційно змінюються для всіх альтернатив, то всі оцінки K_n лишаються незмінними.

Висновки

Запропонована математична модель для надання можливості керівній особі, що приймає відповідальне рішення, але не має спеціальних знань, стати провідним учасником процесу вибору нових технологій чи устаткування для модернізації виробництва. Багатофакторне ранжирування альтернатив розглядається як задача лінійного програмування і досягається шляхом їх комплексного оцінювання за всіма показниками ефективності, частина яких (чи навіть всі) можуть бути нечіткими. Оптимальний варіант ранжирування альтернатив відшукується штучним створенням та поступовим посиленням конкуренції між ними, в якій кожна альтернатива «аргументує» повним набором своїх показників.

Задача комплексного оцінювання альтернатив розв'язана аналітично, наведено розрахункові залежності для практичного застосування моделі, яке пояснюється конкретними прикладами.

Модель може застосовуватись для багатокритеріального порівняння і ранжирування будь-яких однакових за призначенням об'єктів з відомими показниками ефективності (корисності).

Список літератури

1. Подбор установок погружных центробежных насосов к нефтяным скважинам [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.autotechnologist.com/d/method1.doc
2. Характеристика центробежного насоса [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nasosinfo.ru/node/16>
3. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1980. – 208 с.
4. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: Учебник / О. И. Ларичев. – М.: Логос, 2002. – 392 с.
5. Гольдштейн А. Л. Теория принятия решений. Задачи и методы исследования операций и принятия решений: Учебное пособие для вузов / Гольдштейн А. Л. – Пермь: ПГТУ, 2009. – 360 с.

O. L. Kotlyarov

Institute of General Energy of National Academy of Sciences of Ukraine

TOOLS OF DECISION MAKING SUPPORT FOR THE MODERNIZATION OF OIL FIELDS

In the paper, we propose a method for the multiple-criteria estimation of the alternatives of an innovative technology (equipment) for their comparison, ranking, and selection of the best under conditions when a part of the parameters of alternative efficiency may be fuzzy. The method is based on linear programming; and the parameters of efficiency influence the results of calculations through the objective function and certain limitations. One seeks for the best option of ranking of the alternatives by means of the artificial creation and gradual magnification of competition between them, where each "argues" by the complete set of its performance parameters. The essence of the proposed method is illustrated by the example of alternatives of a down hole pump unit for the rise of oil reservoir fluid.

We have developed the mathematical model and its implementation in MS Excel. These tools enable the decision-maker, who does not have the corresponding expertise, to become a leading participant in the process of selecting the best technologies and to make his own choice consciously. The model has a hierarchical structure. The problem is solved in an analytical way; we give the computational formulae for the practical application of our model, which is explained on some specific examples.

The model can be used for multiple-criteria comparison of any objects of the same purpose with known parameters of efficiency (utility), in particular, at selecting the best option for an innovation and investment project.

Keywords: innovative technologies, multiple-criteria selection, mathematical model, linear programming

References

1. Podbor ustanovok pogrzhnykh tsentrobezhnykh nasosov k neftyanym skvazhinam [Selection of submersible centrifugal pumps for oil wells]. Retrieved from: www.autotechnologist.com/d/method1.doc
2. Kharakteristika tsentrobezhnogo nasosa [Characteristics of a centrifugal pump]. Retrieved from: <http://www.nasosinfo.ru/node/16>
3. Venttsel' E. S. (1980). Issledovaniye operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya [Operations research: objectives, principles, methodology]. Moscow: *Nauka* [in Russian].

4. Larichev O. I. (2002). Teoriya i metody prinyatiya resheniy, a takzhe Khronika sobytiy v Volshebnykh stranakh [Theory and Methods of Decision Making, as well as Chronicle of Events in Fairy Lands]. Moscow: Logos [in Russian].

5. Gol'dshteyn A. L. (2009). Teoriya prinyatiya resheniy. Zadachi i metody issledovaniya operatsiy i prinyatiya resheniy [Decision theory. Objectives and methods of operations research and decision-making]. Perm': PGU [in Russian].

УДК 622.323:338.27:519.863

О. Л. Котляров, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Институт общей энергетики НАН Украины

СРЕДСТВА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ НЕФТЯНЫХ ПРОМЫСЛОВ

Предложен метод многофакторного оценивания альтернатив определенной инновационной технологии (оборудования) для их сравнения, ранжирования и выбора лучших в условиях, когда часть показателей эффективности альтернатив (или даже все) могут быть нечеткими. Метод базируется на линейном программировании, показатели эффективности влияют на результаты расчетов через целевую функцию и ограничения. Оптимальный вариант ранжирования альтернатив ищется путем искусственного создания и постепенного усиления конкуренции между ними, в которой каждая альтернатива «аргументирует» полным набором своих показателей. Сущность предложенного метода поясняется на примере альтернатив скважинного насосного агрегата для отбора пластовой жидкости.

Разработаны математическая модель и ее реализация в MS Excel, дающие возможность лицу, принимающему решение, но не имеющему специальных знаний, стать ведущим участником процесса выбора лучших технологий и сознательно сделать свой собственный выбор. Задача решена аналитически, приведены расчетные зависимости для практического применения модели, которое поясняется конкретными примерами.

Модель может применяться для многокритериального сравнения и ранжирования любых объектов одинакового назначения с известными показателями эффективности (полезности), в частности, при выборе лучшего варианта инновационно-инвестиционного проекта.

Ключевые слова: инновационные технологии, многофакторный выбор, математическая модель, линейное программирование

Надійшла 25.10.2015

Received 25.10.2015

УДК 621.311

Ковальчук А. М., к.т.н., доцент, **Сусюк Д. В.**

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА ЗА РАХУНОК ГЕНЕРАТОРА ВОДНЕВО-КИСНЕВОГО ГАЗУ

У статті розглянуто переваги та недоліки твердопаливних установок, обґрунтовано доцільність їх використання. Зокрема, звертається увага на тенденцію росту інтересу до твердого палива, як альтернативи природному газу. В контексті даного питання, розглядається можливість організації автономного енергозабезпечення об'єкту за допомогою установки, яка працює на твердому паливі. Метою цієї статті є відображення недосконалості сухого спалювання твердого палива, оцінка коефіцієнту корисної дії установок, та можливість їх модернізації за рахунок генератора воднево-кисневого газу для підвищення ефективності роботи установок. У роботі також пояснюється принцип роботи генератора та описується дослід, який наглядно показує значне підвищення усіх параметрів твердопаливної установки, вдосконаленої генератором воднево-кисневого газу.

Ключові слова: твердопаливні установки, тверде паливо, воднево-кисневий газ, генератор воднево-кисневого газу, підвищення ефективності твердопаливних установок.

© Ковальчук А. М., Сусюк Д. В., 2015

Вступ. Тенденція до дорожчання природного газу змушує до пошуку дешевших видів енергії, тому все більше людей переконується в ефективності установок на твердому паливі. Використання в опалюванні цього джерела енергії обгрунтоване тим, що воно є найбільш поширеним і легкодоступним на території України. Як наслідок, підвищення вартості твердого палива відбувається значно повільніше, ніж зростання цін на природний газ та нафту. Проте факт поширення використання установок наводить на пошук способів підвищення ефективності їх роботи.

Хоча твердопаливні установки мають досить високий ККД (близько 80 %), це не є крайньою межею. Проводиться пошук способів підвищення ефективності установок, не змінюючи суттєво їх конструкції та принципу дії.

Мета та завдання: відображення недосконалості методики сухого спалювання твердого палива та демонстрація досліду, який показує підвищення ефективності твердопаливних установок, модернізованих генератором воднево-кисневого газу.

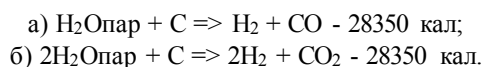
Матеріал та результати досліджень. Твердопаливні установки можуть бути орієнтовані на широкий спектр споживання: від побутового до промислового використання. Особливо цікавою буде пропозиція для підприємств, що займаються деревообробною промисловістю, адже окрім основних видів палива можна спалювати деревообробні відходи. Спалювання відходів допомагає не лише в утилізації, але й істотно дозволяє заощадити на опаленні приміщень. Твердопаливні котли для опалювання приміщень є одним з найдоцільніших рішень в місцях, де газ недоступний або підведення газу до об'єкту україн витратне.

Установки на твердому паливі мають ряд переваг у порівнянні з іншими видами джерел теплової енергії. До них відносяться: доступність, автономність і відносна дешевизна палива, а також те, що вибір палива залежить від самого користувача. Завдяки саме цим перевагам твердопаливні котли користуються популярністю в районах, де є труднощі з постачаннями електрики або газу. Асортимент твердопаливних котлів дуже високий, а паливо для них (наприклад, кам'яне вугілля) за відносно невисокої вартості дає непоганий тепловий ефект.

Тверде паливо є надійним та ефективним джерелом енергії. Його використовують електростанції та теплові електроцентралі для виробництва електроенергії й теплопостачання навколишніх будівель. Проте основним напрямком використання твердого палива є опалювальні котли та міні-котельні, які є одним з найбільш вигідних та зручних способів опалення як комерційних, так і комунальних та приватних об'єктів.

Зі сказаного вище випливає, що актуальним є питання модернізації твердопаливних установок з метою підвищення їх ефективності, у зв'язку з поширенням використання твердого палива. Модернізація повинна допомогти власникам заощадити паливні ресурси та зменшити частоту обслуговування установки.

Одним зі способів покращення спалювання палива є утворення в котлі водяного газу. Водяний газ - це суміш газів, яку отримують при взаємодії водяної пари з вуглецем. Орієнтовний склад газу: CO - 44%, N₂ - 6%, CO₂ - 5%, H₂ - 45%. Отримати водяний газ можна шляхом пропускання через розпечений шар вугілля водяної пари. При температурі нижче 900 °C ця реакція перебігає повільно, а при підвищенні температури - пришвидшується. В результаті реакції утворюються чадний газ (CO) і водень. Водяна пара реагує також з CO, який міститься в суміші газів. Реакція проходить за рівнянням:



Обидві реакції є ендотермічними, з поглинанням тепла. Реакція (б) має місце при надлишку пари. Тому для підтримання температури, водяну пару насичують повітрям або киснем, внаслідок чого склад газу не є ідеальним, а містить домішки азоту та чадного газу [1].

Продукти реакції мають в 2 рази більший об'єм. Саме на підвищення об'єму і витрачається значна кількість внутрішньої енергії реакції. Проте водяний газ має високу теплоту згоряння (2800 ккал/м³), тому і може застосовуватись як додаткове джерело теплової енергії в твердопаливній установці [2].

Пропонується спосіб подачі пари в малогабаритні котлоагрегати з допомогою установки під назвою генератор воднево-кисневого газу (ГВК). Генератор представляє собою металеву посудину (пароутворювач) з отворами для виходу з неї водяної пари, яка розміщується безпосередньо в найбільш розжарений шар палива. До пароутворювача ззовні підведена мідна трубка, через яку за допомогою спеціального пристрою здійснюється подача води крапельним способом. Вода подається після виходу на стабільний режим горіння палива. Після запуску установки, вода випаровується, пара через отвори виводиться із посудини у шар розжареного палива, де й проходить описана вище реакція. Завдяки

генератору воднево-кисневого газу збільшується потужність установки та тривалість її роботи без довантаження твердопаливних елементів.

При використанні генератора воднево-кисневого газу дуже важливо слідкувати за інтенсивністю подачі води, щоб надмірна її кількість не призвела до порушення стабільного режиму горіння палива. Необхідно також підібрати оптимальний режим подачі води в ГВК для забезпечення максимальної ефективності твердопаливної установки, що потребує додаткових досліджень.

Були проведені випробування, призначені для визначення характеристик енергоефективності генератора воднево-кисневого газу (ГВК-1), а також для порівняльного аналізу енергоефективності твердопаливних енергетичних установок в однозначних умовах з застосуванням ГВК та без нього.

Випробування проводилось 20.01.2015 р. у Національному технічному університеті «Київський політехнічний інститут» на базі Навчального наукового центру «Енергетика сталого розвитку» Інституту енергозбереження та енергоменеджменту.

Об'єктом досліджень являється вплив на твердопаливну установку генератора воднево-кисневого газу. Проводилось дослідження процесу кип'ятіння води (2 л.) у ємностях за допомогою експериментальних макетів малогабаритних котлоагрегатів.

Перелік обладнання і засобів вимірювання, використаних для проведення випробувань:

- 1) робоче місце на відкритому повітрі з кліматичними умовами ($0^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, відносна вологість 80%);
- 2) стенд демонстраційний типу мангал з розділенням робочої зони: перша частина з встановленим ГВК; друга — без ГВК (об'єми та площі основ обох частин однакові);
- 3) вугілля деревне у пакетах вагою 1 кг - 4 шт.;
- 4) цифровий мультиметр ТЗЗС з штатною термопарою з точністю вимірювань $\pm 1^{\circ}\text{C}$ - 3 шт.;
- 5) ємність для води на 3 л. з кришкою - 2 шт.

Порядок проведення випробувань:

1. Стенд встановлюється на відкритому повітрі. Обидві частини робочої зони заповнюються однаковою кількістю твердого палива (по 2 кг у кожен частину). Паливо розпалюється протягом 20 хвилин до стадії розжарення всього вугілля, після чого, робоча зона накривається металевою решіткою.

2. На металеву решітку кожної зони встановлюються ємність заповнену водою (2 л.) з температурою $2^{\circ}\text{C}\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ і накривається кришкою.

3. Одночасно із встановленням ємностей запускається ГВК-1 та починається візуальна реєстрація параметрів нагрівання води. Температура води фіксується термопарою. Датчик термопари у робочих ємностях знаходиться посередині висоти шару води. Фіксується час виходу на режим.

4. Запуск ГВК здійснюється шляхом дозованої крапельної подачі води (100 крапель за 40 с.) з спеціальної ємності через мідний водовід.

5. В процесі випробувань вода нагрівається до кипіння. Випробування проводять протягом 1 год.

6. Отримані дані для двох зон порівнюються між собою, результати приведені у таблиці 1.

Результати випробувань:

1) ГВК-1 забезпечує рівномірний нагрів робочої зони та підвищує рівень її енергоефективності за рахунок генерування «водяного» газу (суміші газів H_2 , O_2 , CO), що отримується внаслідок пропускання водяної пари через розжарене вугілля. За одну годину експерименту з ємності з ГВК випарувалось 30% води, а з ємності без ГВК - 15% (тобто на 50% більше).

2) Під час дослідження кип'ятіння води (2л.) у ємності, ГВК забезпечив збільшення потужності на 23%.

3) Після закінчення експерименту візуально спостерігалось зменшення теплової активності та кількості палива у частині робочої зони без ГВК, у той же час, активність частини робочої зони з ГВК була майже незмінною.

4) Використання ГВК у поєднанні з існуючим теплогенеруючим обладнанням, що працює на твердому паливі, дозволить заощадити в середньому до 30% палива.

Таблиця 1– Дані експерименту

Дані для порівняння	З ГВК-1	Без ГВК-1
Час виходу на стабільний робочий режим, хв	24	42
Середня потужність нагрівання води, кВт	0,53	0,41
Кількість води, яка випарувалась за 1 годину експерименту, л	0,6	0,3
Максимальна температура води у ємностях, $^{\circ}\text{C}$	108	95

Висновки. Простота самого генератора воднево-кисневого газу та його принципу дії не створює суттєвих проблем для модернізації з його допомогою твердопаливних установок. Ефективність установки значно зростає завдяки використанню доступного та дешевого ресурсу – води. Проте наведені результати випробувань відображають лише покращення параметрів горіння невеликої кількості твердого палива, для великих установок на твердому паливі необхідно проводити додаткові дослідження.

Список літератури:

1. Токарев Г.Г. Газогенераторные автомобили, - Машгиз, 1955. - 207 с. (С - 104).
2. Мезин И.С. Транспортные газогенераторы. - М: СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948 4.1. - 211 с. (С - 154).
3. Н.М. Цивенкова, А.А. Голубенко. Сучасні енергоефективні технології використання відходів біомаси в сільському, лісовому та комунальному господарствах // Вісник Житомирського національного агроекологічного університету Науково-теоретичний збірник - 2009. - № 1 (С.: 273, 274).

Kovalchuk A. M., Susiuk D. V.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

INCREASING EFFICIENCY OF USING THE SOLID FUEL BY A HYDROGEN-OXYGEN GAS GENERATOR

The article examined the advantages and disadvantages of solid units, the expediency of their use. In particular, draws attention to the tendency of growth of interest in solid fuels as a substitute for traditional sources of energy. In the context of this issue, the possibility of organization of independent energy facility through the installation that works on solid fuel. The purpose of this article is to reflect the imperfections of dry solid fuel burning, criticism coefficient of performance settings and the ability to modernize by hydrogen-oxygen gas generator to improve the efficiency of plants. The paper also explains the principle of the generator and describes research that clearly shows a significant increase in all parameters for solid installation, advanced hydrogen-oxygen gas generator.

Keywords: the solid fuel units, solid fuel, hydrogen-oxygen gas, hydrogen-oxygen gas generator, increasing efficiency of solid fuel units.

References

1. Tokarev G. G. Producer gas vehicles - Mashgiz, 1955. - 207 p. (P - 104).
2. Mezin I. S. Transportation gasifiers. - M: SELKHOZGIZ 1948 4.1. - 211. (P - 154).
3. N. M. Tsyvenkova, A. A. Golubenko. Modern energy efficient technologies of using waste biomass in agriculture, forestry and utilities // Visnyk Zhytomyrskoho natsionalnoho ahroekolohichnoho universytetu Naukovo-teoretychnyi zbirnyk, 2009. - № 1 (p.: 273, 274)

УДК 621.311

Ковальчук А. М., к.т.н., доцент, Сусюк Д. В.

Национальный технический университет «Киевский политехнический институт»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ЗА СЧЕТ ГЕНЕРАТОРА ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ГАЗА

В статье рассмотрены преимущества и недостатки твердо топливных установок, обоснована целесообразность их использования. В частности, обращается внимание на тенденцию роста интереса к твердому топливу в качестве замены природного газа. В контексте данного вопроса, рассматривается возможность организации автономного энергообеспечения объекта с помощью установки, которая работает на твердом топливе. Целью этой статьи является отражение несовершенства сухого сжигания твердого топлива, оценивание коэффициента полезного действия установок, и возможность их модернизации за счет генератора водородно-кислородного газа для повышения эффективности работы установок. В работе также объясняется принцип работы генератора и описывается опыт, который наглядно показывает значительное повышение всех параметров твердо топливной установки, усовершенствованной генератором водородно-кислородного газа.

Ключевые слова: твердо топливные установки, твердое топливо, водородно-кислородный газ, генератор водородно-кислородного газа, повышение эффективности твердо топливных установок.

О.Л. Радченко, канд. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України

РОЗРАХУНОК КОМПЛЕКСУ «ВІДНОВЛЮВАНЕ ДЖЕРЕЛО – АКУМУЛЯТОР» З МАКСИМАЛЬНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕРОВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

В роботі представлено алгоритм розрахунку ємності акумуляторної батареї в процесі експлуатації. Для усунення впливу зміни значення ємності акумулятора розроблено порядок її розрахунку, в якому використано в якості головного показника акумулятора значення енергії, яку він має в процесі роботи комплексу «відновлюване джерело – акумулятор».

Ключові слова: акумулятор, відновлюване джерело енергії, максимальне використання енергії.

Вступ. Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які перетворюють енергію вітру, випромінювання Сонця та інших джерел, зокрема, в електричну енергію є досить актуальним. ВДЕ мають як позитивні властивості – відсутність шкідливих викидів, можливість використання майже без обмежень та інші, так і певні недоліки. Найбільш відомим недоліком ВДЕ є їх недостатньо прогнозована потужність в залежності від часу. Для послаблення цього недоліку вдаються, зокрема, до спільного з ВДЕ застосування накопичувачів енергії (НЕ). Дія НЕ полягає в акумуляванні електричної енергії, коли обсяги її споживання менші від генерації ВДЕ, та живленні споживачів в разі недостатнього обсягу генерації ВДЕ. Застосування НЕ дозволяє виключити або послабити коливання напруги в електричній мережі при використанні ВДЕ.

За результатами аналізу властивостей сучасних НЕ, акумулятори (АБ) різних типів з урахуванням їх питомих показників (5÷110 Вт·год/кг, 40÷1100 Вт/кг) можна вважати найбільш придатними для тривалого в часі використання спільно з ВДЕ [1]. Кращі показники за питомою потужністю мають суперконденсатори. Проте, суперконденсатори мають більший рівень саморозряду порівняно з АБ [2]. Застосування саме АБ, як НЕ що можуть споруджуватись за короткий час та практично без обмежень щодо розташування, є одним з перспективних напрямів підвищення ефективності використання ВДЕ. Виходячи з зазначених позитивних властивостей АБ в якості НЕ розглянемо їх використання для спільної роботи з ВДЕ.

Недостатня передбачуваність в часі обсягу надходження енергії від Сонця, вітру та інших відновлюваних джерел, яку використовують для перетворення у ВДЕ, зокрема, в електричну енергію, ставить задачі максимального використання цієї енергії безпосередньо та/або її збереження для використання в майбутньому. Забезпечення одночасного розв'язання цих задач підвищує ефективність застосування ВДЕ. Одним з шляхів розв'язання зазначених задач є такий вибір НЕ, що забезпечить накопичення всього надлишку енергії, який утворюється як різниця між виробленою ВДЕ та спожитою енергіями [3, 4]. Постійна наявність певного запасу енергії у НЕ, яку можна використовувати в разі недостатнього обсягу генерації ВДЕ, є важливою властивістю роботи комплексу «ВДЕ – НЕ». Визначення параметрів НЕ, який може забезпечити постійну наявність потрібного обсягу енергії при спільній роботі з ВДЕ, є ще недостатньо опрацьованим питанням.

Мета та завдання. Необхідним є визначення умов, за яких можливе максимальне використання виробленої ВДЕ енергії за умови забезпечення постійно зарядженого стану АБ в складі НЕ. Для цього необхідно отримати залежність параметрів НЕ від режиму виробництва енергії ВДЕ та її споживання/акумулявання.

В якості ВДЕ обрано фотоелектричну батарею як таку, що не має властивостей акумулявання енергії. Її застосування потребує виключно зовнішнього НЕ.

Управління процесом заряду/розряду АБ найбільш часто виконують за фактом наявності/відсутності позитивної різниці між енергією генерованою ВДЕ та спожитою навантаженням [5]. При цьому, в загальному випадку, може як не вистачити ємності НЕ для збереження надлишку енергії виробленої ВДЕ, так і енергії акумуляованої в НЕ для використання його як необхідного додаткового джерела енергії для живлення навантаження.

Слід зазначити, що в разі застосування АБ в якості НЕ, обсяг відбору енергії обмежений. Це обумовлено особливостями роботи АБ в режимі розряду. Для більшості АБ не рекомендовано відбирати в режимі розряду обсяг енергії більше 30% від номінального. Перевищення цього обсягу призводить до

значного скорочення терміну використання АБ. Тому актуальною є задача визначення таких параметрів НЕ при безпечній його експлуатації, які б забезпечили як максимальне використання енергії виробленої ВДЕ, так і безперебійне живлення споживачів.

Матеріал і результати досліджень. В чисельному вимірі енергію, яку містить АБ, можна визначити як результат множення значення напруги між клемми АБ на значення її ємності. Звичним для АБ є визначення номінального значення ємності. Тому далі, для характеристики АБ, яка вже не є повністю зарядженою в процесі експлуатації, будемо замість терміну «ємність» використовувати термін «заряд». АБ в залежності від режимів заряд/розряд, що вже відбулись, в кожний момент часу має певний електричний заряд (вимірюється у А·год), який можна чисельно виразити з використанням безрозмірної величини SOC (state of charge) – відношення значення поточного електричного заряду АБ до її номінальної ємності. Якщо розглядати роботу АБ на послідовних інтервалах часу протягом періоду певної тривалості, зв'язок між значеннями $SOC(t)$ на поточному інтервалі часу та $SOC(t-1)$ на попередньому інтервалі часу можна визначити за залежністю:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{E_{RES}(t) - (E_{load}^{DC}(t) + E_{load}^{AC}(t) / \eta_{inv})}{V_{bat} C_{bat}} \quad (1)$$

де $E_{RES}(t)$ - обсяг енергії, виробленої ВДЕ;

E_{load} - обсяг енергії, спожитий навантаженням (верхній індекс DC стосується постійного струму, AC – змінного);

η_{inv} - коефіцієнт що враховує процеси перетворення електричної енергії постійного струму в змінний;

V_{bat} - напруга на клеммах АБ;

C_{bat} - ємність АБ.

Повне використання енергії ВДЕ за умови безперебійного постачання навантаження споживачів відповідає зарядженому стану АБ на кожному з послідовних інтервалів часу $t_0, t_1, t_2, \dots, t_T$ всього періоду роботи ВДЕ. Цей стан можна описати залежністю (критерій інваріантності SOC):

$$SOC(t_0) = SOC(t_T) \quad (2)$$

У залежності (2) t_0 – початок періоду роботи ВДЕ (початок розрахункового циклу). З урахуванням (2) залежність (1) має вигляд:

$$SOC(t_T) = SOC(t_0) + \sum_{t=t_1}^{t_T} \frac{E_{RES}(t) - (E_{load}^{DC}(t) + E_{load}^{AC}(t) / \eta_{inv})}{V_{bat} C_{bat}} \quad (3)$$

При цьому умова, яку відображає формула (2), з урахуванням (3), дає залежність:

$$\sum_{t=t_1}^{t_T} [E_{RES}(t) - (E_{load}^{DC}(t) + E_{load}^{AC}(t) / \eta_{inv})] = 0 \quad (4)$$

Залежність (4) дозволяє визначити необхідне значення $E_{RES}(t)$ для ВДЕ та обрати відповідні технічні засоби його реалізації відповідно до потреб живлення навантаження споживачів електричною енергією. Тобто з використанням залежності (4) можна визначити в даному випадку кількість фотоелектричних панелей певного типу, які забезпечать виробництво електричної енергії, обсяг якої обумовлює її споживання.

Оскільки $E_{RES}(t)$ змінюється випадковим чином, енергія, яку накопичує/відає АБ може бути визначена, коли рівність 0 в залежності (4) не виконується, тобто утворюється надлишок/дефіцит електричної енергії виробленої ВДЕ. Енергія $E_{bat}(t)$, яку накопичує/відає АБ, може бути визначена відповідно до (4) залежністю

$$E_{bat}(t) = E_{RES}(t) - (E_{load}^{DC}(t) + E_{load}^{AC}(t) / \eta_{inv}) \quad (5)$$

Залежність (5) дає можливість визначити ємність АБ, якщо вона є постійною величиною, шляхом ділення правої та лівої частин цієї залежності на V_{bat} . Проте, за результатами досліджень [6] показано, що ємність АБ може залежати, зокрема, від струму розряду, що відображено на рис. 1.

На рис.1 відображено результати експериментальних досліджень, у яких розглянуто наступні величини: C – поточне значення ємності АБ, i – струм розряду, C_m - максимальне значення ємності АБ. Криві 1, 2, 3 на рис. 1 відображають залежність ємності АБ від струму розряду для номінальних ємностей АБ 7,5 А·год, 47 А·год та 110 А·год відповідно.

Змінюється ємність АБ також під дією температури навколишнього середовища та тривалості експлуатації.

Для подальшого використання залежності (5) необхідно уникнути впливу на результат непостійності значення ємності АБ. Для цього замість ємності АБ будемо розглядати енергією, яку містить АБ. Будемо оцінювати цю енергію шляхом визначення заряду АБ $Q(t)$ (вимірюється у А год).

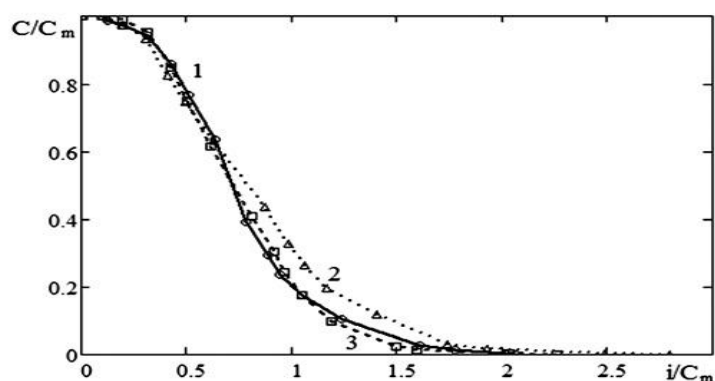


Рисунок 1 – Залежність ємності АБ типу SBLE фірми SAFT від значення струму розряду

Обсяг енергії, яку містить АБ в кожний момент часу, можна розглядати як залежний від величини SOC. При цьому в чисельному виразі $Q(t) = C_{bat} SOC(t)$, де C_{bat} поточне значення ємності АБ, яке неможливо визначити в процесі роботи.

В кожний момент часу заряд АБ буде визначати сума двох складових – заряду АБ на початку роботи $Q(t)_0$ та всієї енергії, яку накопичено АБ на поточний момент часу. При цьому з урахуванням формул (3) та (5) можна отримати наступну залежність:

$$Q(t) = Q(t)_0 + \sum_{t=t_1}^t E_{bat}(t) / V_{bat} \quad (6)$$

Значення $Q(t)$ в залежності (6) має бути більше 0, що відповідає виключно зарядженому стану АБ. Досягти виконання цієї умови можна відповідним чином вибираючи значення $Q(t)_0$.

Ілюстрацію виконання цієї умови можна пояснити з використанням кількісної різниці між енергіями, яку виробляє ВДЕ та споживає навантаження. Для ВДЕ – фотоелектричної батареї, застосовано розрахунковий графік виробництва енергії, характерний для сонячного дня. Максимум виробництва енергії припадає на інтервал часу доби 12÷14 годин. Для навантаження споживачів застосовано розрахунковий графік споживання енергії з максимумами в інтервалах часу доби 10÷12 годин та 15÷17 годин. З використанням цих графіків отримано графік споживання енергії $E_{bat}(t)$ відповідно до формули (5), який представлено на рисунку 2. Значення енергії по вісі ординат представлено у Вт год.

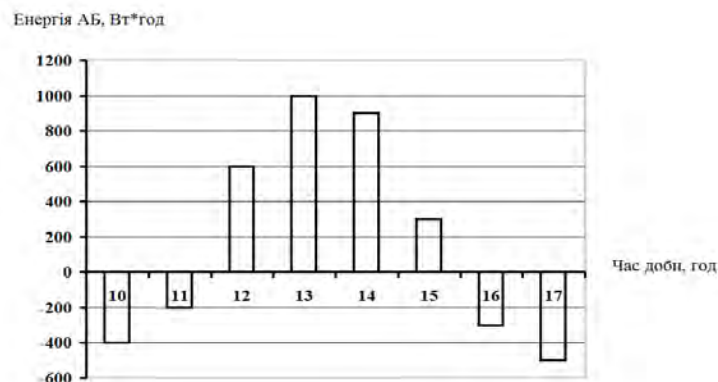


Рисунок 2 – Розрахункові значення $E_{bat}(t)$

На рисунку 3 представлено розрахунковий графік, який відображає значення $Q(t)$ відповідно до залежності (6) за умови $Q(t)_0 = 0$ з використанням числових значень, наведених на рисунку 2. При цьому обрано значення $V_{bat} = 12$ В. По вісі ординат значення заряду вимірюються в А·год.

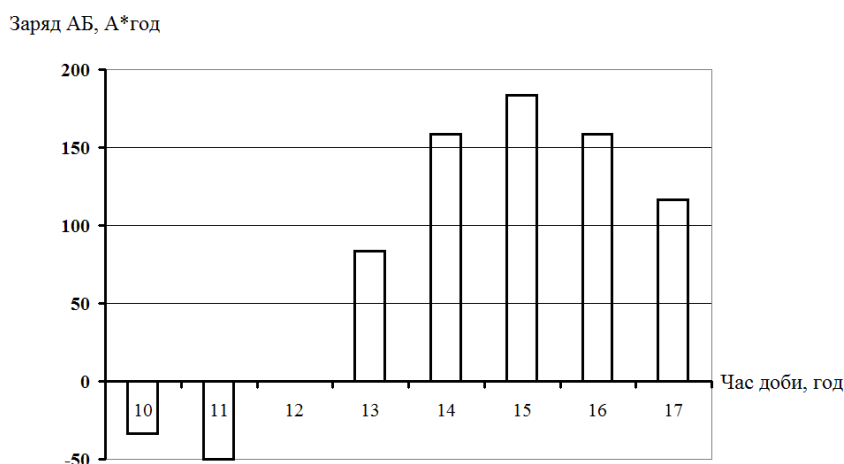


Рисунок 3 - Розрахункові значення $Q(t)$

З рисунку 3 видно, що значення $Q(t)_0$ повинно мати числове значення ≥ 50 А·год (відповідає значенню часу доби 11 годин) для забезпечення отримання виключно позитивних значень $Q(t)$ при його обчисленні згідно з формулою (6).

Протягом всього періоду роботи ВДЕ, залежно від обсягу виробленого ним обсягу енергії, значення заряду АБ згідно з формулою (6) може змінюватись від мінімального Q_{\min} до максимального Q_{\max} . Ці значення можна визначити з всього обчисленого ряду значень наступним чином:

$$Q_{\min} = \min(Q(t)), \quad Q_{\max} = \max(Q(t)), \quad t = t_1, t_2, \dots, t_T$$

Оскільки значення Q_{\min} має бути позитивним (умова постійно зарядженого АБ), значення ємності АБ в чисельному виразі повинно відповідати наступній умові:

$$C_{bat} \geq Q_{\max} - Q_{\min} \quad (7)$$

Ще однією умовою роботи НЕ має бути обмеження значення електричного струму АБ на визначеному виробником рівні в процесі її заряду чи розряду. Значення цього струму може бути визначено з використанням значення енергії, яку накопичує/віддає АБ. Цю умову можна записати наступним чином:

$$C_{bat} \geq |E_{bat}(t)| / V_{bat}, \quad t = t_1, t_2, \dots, t_T \quad (8)$$

Відомо, що АБ мають певні обмеження щодо глибини розряду (цю величину позначають DOD – depth of discharge) – відношення відданої в навантаження енергії до результату множення номінальної ємності АБ на номінальне значення напруги на її клеммах. При цьому повинно виконуватись співвідношення $SOC + DOD = 1$.

Максимальне значення DOD для більшості типів АБ становить 0,2 – 0,3. Перевищення припустимого значення DOD може суттєво скоротити термін експлуатації АБ.

З урахуванням залежностей (7), (8) та значення DOD можна визначити значення потрібної ємності АБ для роботи в комплексі «ВДЕ – АБ» за умови її постійної зарядженості:

$$C_{bat} = \max \left[(Q_{\max} - Q_{\min}), |E_{bat}(t)| / V_{bat} \right] \frac{1}{DOD}, \quad t = t_1, t_2, \dots, t_T \quad (9)$$

Розрахунок відповідно до залежності (9) можливо виконати за наявності графіка електричного навантаження споживачів та прогнозних даних щодо виробітку електричної енергії ВДЕ. Розрахунок необхідно виконати для характерних періодів використання комплексу ВДЕ-АБ - залежно від пори року, робочого та вихідного днів тощо. Особливу увагу слід приділити забезпеченню умови обмеження значення струму розряду АБ. Значення ємності АБ за результатами проведених розрахунків має задовольняти всім обраним періодам використання комплексу ВДЕ-АБ.

Висновки

1. Дієвим заходом для підвищення ефективності використання ВДЕ є максимальне використання виробленої ним енергії за рахунок одночасно як живлення навантаження споживачів, так і акумулювання надлишку виробленої енергії.

2. Запропонований порядок розрахунку ємності електричного акумулятора для комплексу «відновлюване джерело енергії – акумулятор» дозволяє не враховувати зміну цієї ємності в процесі експлуатації.

3. Вибір ємності акумулятора (відповідно до запропонованого порядку розрахунку) забезпечує його тривалу експлуатацію, завдяки постійно зарядженому стану акумулятора, на рівні не нижче визначеного виробником.

Список літератури

1. ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES: REVIEW [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.ip.simr.pw.edu.pl/zn/artykuly/zn2\(102\)2015/013_021.pdf](http://www.ip.simr.pw.edu.pl/zn/artykuly/zn2(102)2015/013_021.pdf)

2. Electricity Storage in the Power Sector [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.iphe.net/docs/Events/Seville_11-12/Workshop/Background%20Materials/Extract%20SET%20Plan_electricity%20storage%20in%20power%20sector.pdf

3. Jing Li J., Wei W., Xiang J.A Simple Sizing Algorithm for Stand-Alone PV/Wind/Battery Hybrid Microgrids // Energies, 2012. – V.5, p. 5307-5323. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.mdpi.com/journal/energies.

4. Костюк В.О., Ханицька О.О. Поєднання вимог щодо керування й надійності в задачах вибору раціональної конфігурації гібридної електро-постачальної системи з використанням ВДЕ // Збірник тез доповідей XII Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)». – Вінниця, ВНТУ. – 2014. – С.145.

5. Bernal-Agustin J.L. Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems 2009 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. –V.13, p. 2111–2118

6. Галушкин Н.Е., Язвинская Н.Н., Галушкина И.А. Анализ использования эмпирических соотношений для оценки емкости никель-кадмиевых аккумуляторов фирмы SAFT длительного режима разряда [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=9999946

O.L. Radchenko

Institute of General Energy of National Academy of Sciences of Ukraine CALCULATION OF COMPLEX "RENEWABLE ENERGY SOURCE- BATTERY" WITH MAXIMUM USE OF THE ENERGY GENERATED

Distribution renewable sources such as electrical energy due to their good qualities absence of harmful emissions, almost no possibility of placing limitations and others. Thus renewable energy sources have disadvantages, among which the most prominent insufficient target power vs. time. To reduce or eliminate this drawback, electric energy accumulators are used, in particular, batteries.

Using the battery as energy storage at a secure and long-term of its operation, together with renewable energy sources should ensure uninterrupted power load consumers. To fulfill these conditions developed procedure for calculating complex "renewable source - battery" of electrical energy.

The system for calculating complex "renewable source - battery," which provided the use of all generated electricity. The conditions under which the battery is charged to the required level, providing both permanent operation and uninterrupted power load consumers.

Keywords: battery, renewable energy, maximum utilization of energy.

References

1. ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES: REVIEW [Electronic Source]. – Access mode: [http://www.ip.simr.pw.edu.pl/zn/artykuly/zn2\(102\)2015/013_021.pdf](http://www.ip.simr.pw.edu.pl/zn/artykuly/zn2(102)2015/013_021.pdf)

2. Electricity Storage in the Power Sector [Electronic Source]. – Access mode: http://www.iphe.net/docs/Events/Seville_11-12/Workshop/Background%20Materials/Extract%20SET%20Plan_electricity%20storage%20in%20power%20sector.pdf

3. Jing Li J., Wei W., Xiang J.A Simple Sizing Algorithm for Stand-Alone PV/Wind/Battery Hybrid Microgrids // Energies, 2012. – V.5, p. 5307-5323. [Electronic Source]. – Access mode: www.mdpi.com/journal/energies.

4. Kostiuk V.O., Khanytska O.O. The combination of requirements management and reliability problems in the rational configuration of the hybrid electric provider systems using renewable // Zbirnyk tez dopovidei XII Mizhnarodnoi konferentsii “Kontrol i upravlinnia v skladnykh systemakh (KUSS-2014)”. – Vinnytsia, VNTU. - 2014. - p.145.

5. Bernal-Agustin J.L. Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems 2009 //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. –V.13, p. 2111–2118

6. Galushkin N.E., Yazvinskaya N.N., Galushkina I.A. Analysis of the use of empirical relations to estimate the capacity of nickel-cadmium batteries the company SAFT long discharge mode [Electronic Source]. – Access mode: http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=9999946

УДК 620.92 + 621.31

А.Л. Радченко, канд. техн. наук

Институт общей энергетики НАН Украины

**РАСЧЕТ КОМПЛЕКСА «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК - АККУМУЛЯТОР» С
МАКСИМАЛЬНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ЭНЕРГИИ**

В работе представлен алгоритм расчета емкости аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации.

Для устранения влияния изменения значения емкости аккумулятора разработан порядок ее расчета, в котором использован в качестве главного показателя аккумулятора значение энергии, которую он содержит в процессе работы комплекса «возобновляемый источник - аккумулятор».

Ключевые слова: аккумулятор, возобновляемые источники энергии, максимальное использование энергии.

Надійшла 18.10.2015

Received 18.10.2015

УДК 621.331:621.311.4-047.38

Д. В. Міронов, асистент кафедри Електропостачання залізниць

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені ак. В. Лазаряна

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТО І Р ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ
ПІДСТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ УЗАГАЛЬНЕНИХ КРИТЕРІЇВ**

Дані, отримані в процесі діагностування технічного стану силового обладнання, важко порівняти між собою, і вони не завжди задовольняють умовам, які дозволили б обґрунтовано застосувати для їх аналізу статистичні методи оцінки експлуатаційних показників. Складність постановки висновку полягає в тому, що за окремими технічними показниками устаткування або параметрами роботи дати суб'єктивну оцінку його стану практично неможливо. Необхідно визначити узагальнені характеристики рівня експлуатації силового обладнання та проводити їх багатофакторний аналіз. Для вирішення цього завдання розглянуто можливість застосування функції бажаності Харінгтона для оцінки технічного стану обладнання тягових підстанцій з урахуванням багатофакторності процесу. На прикладі швидкодіючого вимикача постійного струму ВАБ-43 проведено розрахунок узагальненого критерію якості об'єкта діагностування.

Запропоновано методіку оцінки технічного стану обладнання тягових підстанцій, яка передбачає використання сучасних методів діагностики та кваліметрії і дозволяє створити систему управління якістю процесу діагностування, що підвищує ефективність існуючої системи ТО і Р електрообладнання. Використання узагальненого критерію якості об'єкта діагностування може служити основою нового методу обробки діагностичної інформації.

Ключові слова: тягова підстанція, діагностування, технічне обслуговування, функція бажаності Харінгтона, багатофакторний аналіз, стратегія ТО і Р.

Вступ

Ефективність і надійність функціонування електротехнічного обладнання підстанцій електрифікованих залізниць залежить від його технічного стану. Сучасне електротехнічне обладнання має достатньо високі розрахункові показники надійності, однак у процесі експлуатації під дією зовнішніх умов і режимів роботи початковий стан обладнання безперервно погіршується, що призводить до додаткових втрат енергії, зниження експлуатаційної надійності і зростання аварійності обладнання та кількості відмов. Надійність функціонування електроустаткування протягом життєвого циклу залежить не тільки від якості виготовлення, але і від умов експлуатації, якісного технічного обслуговування і своєчасного ремонту.

Забезпечення контролю, експертизи, нормування та моніторингу технічного стану енергетичного обладнання, використання інноваційних технологій діагностування є основою стратегії підвищення експлуатаційної надійності будь-якого технічного об'єкту [1, 2]. Сучасне енергетичне обладнання представляє собою складні технічні об'єкти, надійність роботи яких повинна забезпечуватися, прогнозуватися і діагностуватися на всіх етапах життєвого циклу. Для електрообладнання принципово важливо визначити, які параметри контролювати і які чинники враховувати при оцінці його технічного стану, тобто вирішити питання про глибину діагностування. Як відомо, при оцінці технічного стану аналізу підлягають механічні (вібраційні), теплові, електричні і інші чинники, що мають різну фізико-хімічну природу. При цьому згадані чинники призводять до зміни окремих властивостей електроустаткування. У цьому випадку оцінка технічного стану за окремими властивостями електрообладнання виконується більш менш задовільно. Проте загальна оцінка технічного стану пристрою надзвичайно ускладнена через необхідність зіставлення показників різної фізичної природи і відсутності між ними взаємозв'язку, який можна описати аналітичним виразом. Ця проблема примушує шукати інший підхід до загальної оцінки технічного стану електрообладнання.

Для адекватної оцінки якості експлуатаційних показників енергетичного обладнання необхідно користуватися узагальненими характеристиками їх роботи, в тому числі і визначеними на основі теорії нечітких множин значеннями функції бажаності. При аналізі технічного стану енергетичного обладнання одним з найбільш зручних для практичного використання методів математичного моделювання є, зокрема, методика теорії нечітких множин, заснована на об'єднанні часткових показників якості в узагальненій - в так звану узагальнену функцію бажаності D (функцію Харінгтона) [3-8].

Мета та завдання

Розглянути можливість використання узагальненої функції бажаності Харінгтона для оцінки технічного стану обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць.

Матеріал і результати досліджень

Для побудови узагальненої функції бажаності D пропонується перетворити виміряні значення різних критеріїв у безрозмірну шкалу бажаності d [3, 6]. Шкала бажаності, в яку перетворюються значення часткових критеріїв, є безрозмірною психофізичною шкалою. Вона встановлює відповідність між значеннями критеріїв у фізичних шкалах і психофізичними параметрами – суб'єктивними оцінками бажаності того чи іншого значення відповідного критерію. Шкала влаштована так, що кращому значенню критерію відповідає більше значення бажаності. Для перетворення значень критерію в шкалу бажаності, множина значень кожного критерію поділяється на підмножини, щодо яких дослідник може сказати, що якість об'єкта на кожному з них близька до оцінки “добре”, “задовільно”, “погано” (градаций може бути і більше).

Побудова шкали бажаності, яка встановлює співвідношення між значенням критерію y і відповідним йому значенням d (частковою функцією бажаності), є суб'єктивною і відображає ставлення дослідника до окремих критеріїв [9].

Для побудови шкали бажаності зручно використовувати метод кількісних оцінок з інтервалом значень бажаності d від нуля до одиниці, хоча можливі й інші варіанти шкали. Значення $d = 0$ (або $D = 0$) відповідає найгіршому значенню критерію, а $d = 1$ ($D = 1$) – найкращому значенню, причому подальше поліпшення критерію або неможливе, або не представляє інтересу. Проміжні значення бажаності і відповідні їм числові значення наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Базові позначки шкали бажаності	
Кількісна відмітка на шкалі бажаності d	Бажаність значення критерію y
0,80 - 1,00	Дуже добре
0,63 - 0,80	Добре
0,37 - 0,63	Задовільно
0,20 - 0,37	Погано
0,00 - 0,20	Дуже погано

Найпростішим типом перетворення служить таке, в якому існує верхня і (або) нижня межа значень критеріїв, причому ці межі є єдиними і не допускають змін. Поза цими межами значення $d = 0$, між ними значення $d = 1$.

Часткова функція бажаності при односторонньому обмеженні має вигляд:

$$\begin{aligned} d &= 0, y < y_{\min} \\ d &= 1, y \geq y_{\min} \end{aligned} \quad (1)$$

Аналогічним чином можна отримати часткову функцію бажаності, якщо задано обмеження критерію зверху.

Якщо для даного параметру існує двостороннє обмеження, то:

$$\begin{aligned} d &= 0, y < y_{\min} \text{ і } y > y_{\max}, \\ d &= 1, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}. \end{aligned} \quad (2)$$

Завжди бажано, щоб значення відгуку знаходилося не тільки між граничними значеннями, але і на певній відстані від них через властиві виробничому процесу випадкові коливання. Для двостороннього обмеження перетворення вимірюваного критерію y в шкалу d виконується за допомогою виразу:

$$d = \exp\left(-\left|y'\right|^n\right), \quad (3)$$

де n - додатне число, не обов'язково ціле;

$$y' = \frac{2y - (y_{\max} + y_{\min})}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (4)$$

Показник ступеня n можна обчислити, задавши вимірюваному значенню y відповідне значення бажаності, переважно в інтервалі $0,6 < d' < 0,9$ за формулою:

$$n = \frac{\ln\left(\ln \frac{1}{d'}\right)}{\ln\left|y'\right|} \quad (5)$$

Для односторонніх обмежень виду $y \leq y_{\max}$ або $y \geq y_{\min}$ більш зручною формою перетворення y в d служить інша експоненціальна залежність:

$$d = \exp\left[-\exp(-y')\right] \quad (6)$$

де d - часткова функція бажаності, а y' обчислюється за формулою:

$$y' = b_0 + b_1 y \quad (7)$$

Коефіцієнти b_0 і b_1 можна визначити, якщо задати для двох значень y відповідні значення бажаності, переважно в інтервалі $0,2 < d < 0,8$.

Маючи кілька критеріїв, перетворених в шкалу бажаності d , можна ввести узагальнений показник якості процесу D , як згортку часткових функцій бажаності. У термінах цієї шкали можна сконструювати середню геометричну згортку:

$$D_G = \prod_{1 \leq i \leq q} d_i^{\alpha_i} = \exp\left[-\sum_{i=1}^q \alpha_i \exp(-y'_i)\right], \quad (8)$$

де i - число аналізованих параметрів;

α_i - вагові коефіцієнти, які вказують на значимість часткових критеріїв:

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \sum_{i=1}^q \alpha_i = 1.$$

Для α_i пропонується скористатися методом часткових статистик [10, 11]. Даний метод дозволяє отримати значення вагових коефіцієнтів на основі статистики по частковим критеріям y_i . Для цього розраховуються оцінки середнього квадратичного відхилення по кожному критерію

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2}{n-1}}. \quad (9)$$

Для обчислення α_i використовується співвідношення

$$\alpha_i = \frac{s_j}{\sum_{j=1}^q s_j}. \quad (10)$$

Число аналізованих параметрів систем або об'єктів, які підлягають оцінці та порівнянню шляхом використання функції бажаності, може бути неоднаковим. Це дозволяє порівнювати узагальнені коефіцієнти навіть тоді, коли відсутні частина параметрів або їх значення. Корінь n -го ступеню «згладжує» виникаючі відхилення, а отриманий результат дозволяє оцінювати об'єкт (систему) досить точно. При цьому, якщо який-небудь один відгук є абсолютно незадовільним, узагальнена функція бажаності D повинна дорівнювати нулю, незалежно від значення інших відгуків.

В даній роботі на прикладі швидкодіючого вимикача постійного струму типу ВАБ-43 було виконано оцінку технічного стану шляхом використання функції бажаності. Зроблено припущення, що залежність між контрольованим параметром та відповідною йому частковою функцією бажаності лінійна. Тобто, гранично допустимому значенню параметра відповідає найменший рівень бажаності, а найкращому значенню параметра – найбільше значення бажаності d . Види контрольованих параметрів та межі їх припустимих значень визначено згідно з [12]. При цьому одностороннє обмеження мають наступні контрольовані параметри:

- площа прилягання головних контактів – не менше 70%;
- площа прилягання якоря до магнітопроводу – не менше 70%;
- комутаційний ресурс в залежності від кількості відключень – не більше 80 циклів;
- комутаційний ресурс в залежності від сумарного відключеного струму – не більше 1000 кА.

Двостороннє обмеження накладається на такі контрольовані параметри:

- натискання головних контактів – $25 \leq y \leq 45$ кгс;
- натискання дугогасних контактів – $5 \leq y \leq 20$ кгс;
- провал головного контакту ($\delta 1$) – $0,5 \leq y \leq 3,0$ мм;
- провал дугогасного контакту ($\delta 2$) – $1,0 \leq y \leq 3,5$ мм;
- зазор між дугогасним контактом і рогом ($\delta 6$) у передввімкненому положенні – $2,0 \leq y \leq 5,0$ мм;
- зазор між головними контактами ($\delta 7$) – $12 \leq y \leq 26$ мм;
- зазор між рухомим контактом та упором ($\delta 8$) – $1,0 \leq y \leq 4,0$ мм;
- сумарний зазор між шийками осі і торцями пазів у важелі якоря ($\delta 3$) – $1,0 \leq y \leq 8,0$ мм;
- вільний хід тяги блок-контактів ($\delta 10$) – $1,5 \leq y \leq 2,5$ мм;
- натяг вимикаючих пружин – $30 \leq y \leq 50$ кгс;
- довжина вимикаючих пружин у ввімкненому положенні вимикача – $195 \leq y \leq 205$ мм.

Для односторонніх обмежень до контрольованих параметрів виду $y \leq y_{\max}$, $y \geq y_{\min}$ перетворення значень контрольованих параметрів y в часткові бажаності d виконувалося за виразом (6). Для визначення коефіцієнтів b_0 і b_1 , які входять до виразу (7), з врахуванням лінійної залежності між y та d було встановлено наступні співвідношення: гранично допустимому значенню контрольованого параметра згідно з [12] відповідає рівень бажаності, рівний 0,37 (“погано”), а найкращому – найбільше значення бажаності 0,8 (“дуже добре”) (табл. 2).

Таблиця 2 - Базові значення функцій бажаності і відповідні значення контрольованих параметрів

Вид контрольованого параметра	Значення контрольованого параметра	Значення часткової функції бажаності	Бажаність значення параметра
Комутаційний ресурс в залежності від кількості відключень y_1 , шт.	0	0,8	добре
	80	0,37	погано
Комутаційний ресурс в залежності від сумарного відключеного струму y_2 , кА	0	0,8	добре
	1000	0,37	погано
Площа прилягання головних контактів y_3 , %	100	0,8	добре
	70	0,37	погано
Площа прилягання якоря до магнітопроводу y_4 , %	100	0,8	добре
	70	0,37	погано

Відповідно до (6) маємо:

$$0.8 = \exp[-\exp(-y')], \text{ звідси } y' = 1.5;$$

$$0.37 = \exp[-\exp(-y')], \text{ звідси } y' = 0.0058.$$

Система рівнянь, що визначає коефіцієнти b_0 і b_1 для площі прилягання головних контактів y_3 , має вигляд:

$$\begin{cases} b_0 + 100 \cdot b_1 = 1.5, \\ b_0 + 70 \cdot b_1 = 0.0058. \end{cases}$$

В результаті розв'язання даної системи отримаємо $b_0 = -3.481$, $b_1 = 0.05$. Аналогічно за даними табл. 2 визначено коефіцієнти b_0 і b_1 для комутаційного ресурсу в залежності від кількості відключень y_1 , від сумарного відключеного струму y_2 та для площі прилягання якоря до магнітопроводу y_4 .

В результаті отримано залежності часткових функцій бажаності від нормативних значень контрольованих параметрів вимикача:

$$d_1 = \exp[-\exp(-1.5 + 0.0187 \cdot y_1)], \quad (11)$$

$$d_2 = \exp[-\exp(-1.5 + 0.0015 \cdot y_2)], \quad (12)$$

$$d_3 = \exp[-\exp(3.481 - 0.05 \cdot y_3)], \quad (13)$$

$$d_4 = \exp[-\exp(-1.5 + 0.0187 \cdot y_4)]. \quad (14)$$

При наявності двосторонніх обмежень для контрольованих параметрів виду $y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$ перетворення значень контрольованих параметрів y в часткові бажаності d виконувалося за виразом (3). Для визначення показника ступеню n , який входить до виразу (3), з врахуванням лінійної залежності між значенням контрольованого параметра та значенням часткової функції бажаності встановлені наступні співвідношення: гранично допустимому значенню контрольованого параметра (y_{\max} , y_{\min}) надається значення бажаності, рівне 0,37, а найкращому – 0,8 (табл. 3).

Таблиця 3 - Базові значення функцій бажаності і відповідні значення контрольованих параметрів

Вид контрольованого параметра	Значення контрольованого параметра	Значення часткової функції бажаності	Бажаність значення параметра
Натискання головних контактів y_5 , кгс	35	0,8	добре
	25	0,37	погано
Натискання дугогасних контактів y_6 , кгс	12,5	0,8	добре
	5	0,37	погано
Провал головного контакту ($\delta 1$) y_7 , мм	1,75	0,8	добре
	0,5	0,37	погано
Провал дугогасного контакту ($\delta 2$) y_8 , мм	2,25	0,8	добре
	1,0	0,37	погано
Зазор між дугогасним контактом і рогом ($\delta 6$) y_9 у передввімкненому положенні, мм	3,5	0,8	добре
	2	0,37	погано
Зазор між головними контактами ($\delta 7$) y_{10} , мм	19	0,8	добре
	12	0,37	погано
Зазор між рухомим контактом та упором ($\delta 8$) y_{11} , мм	2,5	0,8	добре
	1	0,37	погано
Сумарний зазор між шийками осі і торцями пазів у важелі якоря ($\delta 3$) y_{12} , мм	4,5	0,8	добре
	1	0,37	погано
Вільний хід тяги блок-контактів ($\delta 10$) y_{13} , мм	2	0,8	добре
	2,5	0,37	погано
Натяг вимикаючих пружин y_{14} , кгс	40	0,8	добре
	10	0,37	погано
Довжина вимикаючих пружин у ввімкненому положенні вимикача y_{15} , мм	200	0,8	добре
	195	0,37	погано

Визначимо коефіцієнт n для натискання головних контактів y_5 за виразом (5), попередньо визначивши коефіцієнт y' за виразом (4):

$$y' = \frac{2 \cdot 34 - (45 + 25)}{45 - 25} = -0,1;$$

$$n = \frac{\ln[\ln(\frac{1}{0,8})]}{\ln|y'|} = 0,651.$$

Аналогічно за даними табл. 3 визначимо коефіцієнт n для натискання головних контактів y_5 , натискання дугогасних контактів y_6 , провалу головного контакту ($\delta 1$) y_7 , провалу дугогасного контакту ($\delta 2$) y_8 , зазору між дугогасним контактом і рогом ($\delta 6$) y_9 у передввімкненому положенні, зазору між головними контактами ($\delta 7$) y_{10} , зазору між рухомих контактом та упором ($\delta 8$) y_{11} , сумарного зазору між шийками осі і торцями пазів у важелі якоря ($\delta 3$) y_{12} , вільного ходу тяги блок-контактів ($\delta 10$) y_{13} , натягу вимикаючих пружин y_{14} , довжини вимикаючих пружин у ввімкненому положенні вимикача y_{15} .

В результаті отримано залежності часткових функцій бажаності від нормативних значень контрольованих параметрів вимикача:

$$d_5 = \exp[-\exp(y'_5)^{0,651}] \quad (15)$$

$$d_6 = \exp[-\exp(y'_6)^{0,932}] \quad (16)$$

$$d_7 = \exp[-\exp(y'_7)^{0,707}] \quad (17)$$

$$d_8 = \exp[-\exp(y'_8)^{0,707}] \quad (18)$$

$$d_9 = \exp[-\exp(y'_9)^{0,554}] \quad (19)$$

$$d_{10} = \exp[-\exp(y'_{10})^{0,771}] \quad (20)$$

$$d_{11} = \exp[-\exp(y'_{11})^{0,554}] \quad (21)$$

$$d_{12} = \exp[-\exp(y'_{12})^{0,422}] \quad (22)$$

$$d_{13} = \exp[-\exp(y'_{13})^{0,932}] \quad (23)$$

$$d_{14} = \exp[-\exp(y'_{14})^{0,651}] \quad (24)$$

$$d_{15} = \exp[-\exp(y'_{15})^{0,932}] \quad (25)$$

Значення контрольованих параметрів шести вимикачів, отримані в результаті міжремонтних випробувань, приведені в табл. 4. За виразами (11-25) ці значення перераховані в часткові функції бажаності d (табл. 5). За формулами (9-10) розраховані вагові коефіцієнти α для кожного з критеріїв, з урахуванням яких за формулою (8) обчислено узагальнену функцію бажаності D .

Таблиця 4 - Значення контрольованих параметрів вимикачів типу ВАБ-43

	Номер досліджуваного вимикача					
	1	2	3	4	5	6
y_1	40	45	48	50	46	46
y_2	450	400	500	612	587	400
y_3	83	80	90	73	78	73
y_4	85	82	89	74	78	82
y_5	30	32	33	26	32	23
y_6	15	16	14	18	17	4
y_7	1,4	1,3	2	2,8	2,4	3,2
y_8	2,8	2,7	2,4	1,3	3,6	1
y_9	3,2	3	3,4	2,4	4,1	2,2

Продовження таблиці 4

	Номер досліджуваного вимикача					
	1	2	3	4	5	6
y_{10}	22,8	23	20	11,2	15,8	12
y_{11}	1,9	2	2,4	0,9	1,5	4,2
y_{12}	5,5	3,6	4,8	1,5	5,5	7,9
y_{13}	2,3	2,2	2,1	1,5	2,2	1,6
y_{14}	36	35	38	32	34	49
y_{15}	197	196	198	195	196	206

Таблиця 5 - Функції бажаності

	Номер досліджуваного вимикача						Значення вагового коеф. α
	1	2	3	4	5	6	
d_1	0,624	0,596	0,578	0,566	0,59	0,59	0,01
d_2	0,645	0,666	0,624	0,572	0,584	0,666	0,022
d_3	0,599	0,551	0,697	0,43	0,518	0,43	0,055
d_4	0,629	0,584	0,684	0,448	0,518	0,584	0,044
d_5	0,529	0,634	0,704	0,393	0,634	0,331	0,079
d_6	0,698	0,612	0,8	0,473	0,537	0,325	0,089
d_7	0,666	0,615	0,726	0,413	0,533	0,329	0,081
d_8	0,572	0,615	0,8	0,439	0,348	0,37	0,091
d_9	0,664	0,58	0,8	0,431	0,548	0,397	0,079
d_{10}	0,536	0,522	0,8	0,337	0,579	0,37	0,088
d_{11}	0,548	0,58	0,8	0,355	0,45	0,342	0,091
d_{12}	0,555	0,569	0,701	0,392	0,555	0,372	0,065
d_{13}	0,537	0,653	0,8	0,368	0,653	0,444	0,084
d_{14}	0,577	0,529	0,704	0,421	0,488	0,4	0,059
d_{15}	0,537	0,444	0,653	0,368	0,444	0,32	0,064
D	0,585	0,579	0,746	0,405	0,517	0,369	
	задов.	задов.	добре	задов.	задов.	погано	

Проаналізуємо результати розрахунку на прикладі швидкодіючого вимикача №6. Значення функції D для даного вимикача дорівнює 0,369, а згідно з табл. 1 дане значення відповідає рівню бажаності “погано”, що, в свою чергу, свідчить про незадовільний технічний стан вимикача. Для визначення причин необхідно проаналізувати часткові функції бажаності контрольованих параметрів даного вимикача. З табл. 5 чітко видно, що значення d_5 , d_6 , d_7 , d_{11} та d_{15} відповідають рівню бажаності “погано”, а це означає, що значення контрольованих параметрів “натискання головних контактів”, “натискання дугогасних контактів”, “провал головного контакту”, “зазор між рухомим контактом та упором” та “довжина вимикаючих пружин у ввімкненому положенні вимикача” знаходяться за межами, встановленими в [12]. Тому рекомендується для вимикача №6 проведення профілактичних робіт з метою усунення дефектів. Дана методика аналізу функції D застосовується і для інших п’яти вимикачів.

Отримане значення узагальноної функції бажаності D являється комплексною оцінкою технічного стану електроустаткування і визначає наступні задачі технічного обслуговування: коригування та оптимізація термінів та обсягів ТО і Р, визначення та безперервна діагностика найбільш критичних за результатами розрахунку часткових функцій бажаності елементів. В залежності від значення узагальноної функції бажаності D пропонуються наступні стратегії ТО і Р:

- для $D \leq 0,37$ – обладнання знаходиться у передаварійному стані. Проводиться безперервне діагностування усіх елементів електроустаткування. При досягненні ними граничного стану проводиться попереджувальний ремонт устаткування. Для забезпечення задовільного технічного стану необхідне покращення контрольованих параметрів та розробка рекомендацій по управлінню якістю утримання обладнання на підставі обслуговування та ремонту за поточним технічним станом. В подальшому при

повторюванні даного результату є сенс розглядати питання про заміну окремих елементів або обладнання в цілому;

- для $0,37 \leq D \leq 0,63$ – обладнання знаходиться у задовільному стані. Питання про призначення термінів ТО і Р вирішується на основі періодичного діагностування за планом, який включається в календарні графіки. Проводиться аналіз часткових функцій бажаності з метою визначення “слабших” показників, по відношенню до яких проводиться безперервне діагностування в процесі експлуатації;

- для $D \geq 0,63$ – обладнання знаходиться на даний момент у гарному стані. В ремонтний цикл, як основну операцію технічного обслуговування, необхідно включити графік контролю технічного стану електрообладнання. На підставі діагностування міжремонтний період кожної одиниці електрообладнання коригується залежно від його фактичного технічного стану.

Як зазначалося вище, діагностування електрообладнання тягових підстанцій пов’язане з отриманням і подальшою обробкою великого об’єму інформації шляхом проведення вимірювань різними діагностичними методами, які за інформативністю і достовірністю різняться між собою. Аналіз результатів вимірювання ряду параметрів обладнання пов’язаний з використанням великої кількості обчислювальних ресурсів, а процес математичної обробки діагностичної інформації є досить складним і об’ємним. Цей процес вимагає значних затрат часу та матеріальних ресурсів. Тому одним із способів підвищення якості діагностування електрообладнання є розробка діагностичного комплексу, який дав би змогу з необхідною точністю і з мінімальними затратами ресурсів визначити технічний стан обладнання. Даний комплекс повинен виконувати наступні задачі:

- оцінка технічного стану електрообладнання перед та після проведення різних видів робіт обслуговуючого характеру;
- поточна оцінка технічного стану електрообладнання в процесі його експлуатації в режимі реального часу.

При вирішенні першого виду задач виконується невелика кількість вимірювань основних діагностичних параметрів електрообладнання під час проведення регламентованих робіт. За результатами даних вимірювань робиться висновок про працездатність обладнання і надаються рекомендації по його подальшій експлуатації.

При вирішенні задач другого виду відбувається багаторазове отримання інформації про стан обладнання під час його експлуатації. При цьому характер і розмірність даних параметрів різняться між собою (для порівняння, різке підвищення температури одного з елементів електрообладнання та поява аномального шуму під час роботи устаткування).

Одним із шляхів зниження об’єму та уніфікації діагностичної інформації, яка вводиться в комплекс, і, відповідно, підвищення швидкодії системи є використання узагальненого діагностичного показника якості. В ролі такого показника використовується узагальнена функція бажаності D . Показник якості спрощує процес обробки великого об’єму діагностичних даних та надає диференційовану оцінку технічного стану обладнання, яка не залежить від способу діагностики.

Висновки

Застосування функції бажаності Харінгтона є доцільним для комплексної оцінки якості ТО і Р обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць, про що свідчить дівість розрахунків, продемонстрованих на прикладі швидкодіючого вимикача постійного струму ВАБ-43. Дана методика розрахунку узагальненого критерію може бути використана для оцінки технічного стану різних типів електрообладнання тягових підстанцій, незалежно від кількості та виду контрольованих параметрів. Можливість багаторівневого застосування функції бажаності Харінгтона та гнучкість запропонованого інструменту дозволяє забезпечити виконання розрахунків комплексної оцінки якості шляхом порівняння різних за характеристиками параметрів, що підтверджує простоту застосування та реальну практичну корисність. Стосовно автоматизації процесу діагностування запропонована методика розрахунку узагальненої функції бажаності D може служити основою нового методу обробки діагностичної інформації.

Аналіз узагальненої функції бажаності D дає змогу будувати оптимальну стратегію ТО і Р, базуючись на фактичному технічному стані електроустаткування, що дозволить зменшити матеріальні та фінансові витрати на проведення технічного обслуговування і ремонту обладнання у порівнянні з системою планово-попереджувальних ремонтів. Розглянутий підхід представляє науковий і практичний інтерес для оцінки і вдосконалення процесів в складних технічних системах, до яких можна віднести систему ТО і Р обладнання тягових підстанцій.

Список літератури

1. Матусевич, О.О. Дослідження експлуатації силового обладнання системи тягового електропостачання залізниць / О.О. Матусевич, Д. В. Міронов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2015. - № 1 (55). – С. 62-77.

2. Міронов, Д. В. Удосконалення технічного обслуговування обладнання тягових мереж на основі процесного підходу / Д. В. Міронов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2014. – № 6(54). – С. 78-86.
3. Harrington E. C. The desirability function. *Industrial Quality Control*, 1965, no. 21(10), p. 124.
4. Жарков, Ю. Системи управління якістю: моніторинг роботи органів з оцінки відповідності з використанням методу Харінгтона / Ю. Жарков, О. Цициліано // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2005. – №1. – С.24-27.
5. Жарков, Ю. Оптимізація критеріїв роботи органів з оцінки відповідності з використанням методу Харінгтона / Ю. Жарков, О. Цициліано // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2004. – №4. – С.36-38.
6. Ахназарова, С. Л. Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии / С. Л. Ахназарова, Л. С. Гордеев. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. – 76 с.
7. Пичкалев, А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств / А. В. Пичкалев // Исследования наукограда. – 2012. – №1 (1). – С. 25-28.
8. Федулова, І. Підходи до оцінки рівня готовності підприємства щодо інноваційного розвитку / І. Федулова // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2011. – № 124/125. – С. 36-40.
9. Чайка, Т. Ю. Проблемы формирования интегрального показателя конкурентоспособности товаров (услуг) / Т. Ю. Чайка // БізнесІнформ. – 2014. – №8. – С. 198 – 204.
10. Ахназарова, С. Л. Статистические методы обработки и планирования экспериментов / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1972. – 65 с.
11. Анохин, А. М. Методы определения коэффициентов важности критериев / А. М. Анохин, В. А. Глозов, В. В. Павельев, А. М. Черкашин // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 8. – С. 3-35.
12. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць. – К. : ТОВ «Інпрес», 2008. - 125 с.

D. V. Mironov

**Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan
IMPROVEMENT THE SYSTEM OF MAINTENANCE SERVICE AND REPAIR FOR TRACTION
SUBSTATIONS EQUIPMENT USING THE GENERALIZED CRITERIA**

It is difficult to compare with each other the data obtained in the process of diagnosing technical condition of power equipment, and they do not always meet the conditions that would reasonably be applied to the analysis of statistical methods for evaluating operational performance. The complexity of setting conclusion is that on certain technical indicators parameters of the equipment or the date subjective assessment of his condition is almost impossible. You must define generalized characteristics of power equipment operation and make their multivariate analysis. To solve this problem consider applying Harrington desirable function for evaluate the technical condition of equipment traction substations taking into account the diversity process. The generalized quality criterion of diagnosing object for high-speed DC circuit breaker VAB-43 was calculate.

The method of estimation the technical condition of the equipment traction substations was propose. It involves the use of modern methods of diagnostics and quality control and to create a quality management system for diagnosis process, which increases the effectiveness of the existing system of maintenance service and repair for electrical equipment. Using generalized quality criterion of diagnosing object can serve as basis for a new method of processing the diagnostic information.

Keywords: traction substation, diagnostics, maintenance service, Harrington desirability function, multivariate analysis, strategy of maintenance service and repair.

References

1. Matusевич О. О., Мironov D. V. Doslidzhennya ekspluatatsiyi sylovoho obladdannya systemy tyahovoho elektropostachannya zaliznyts' [Study of the manual power equipment of traction electrification system of the railways]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnohj transport imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2015, issue 1 (55), pp. 62-77.
2. Mironov D. V. Udoskonalennya tekhnichnoho obsluhovuvannya obladdannya tyahovykh merezh na osnovi protsesnoho pidkhodu [The improvement of maintenance service for traction networks equipment on the base of process approach]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnohj transport imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2014, issue 6 (54), pp. 78-86.
3. Harrington E. C. The desirability function. *Industrial Quality Control*, 1965, no. 21(10), p. 124.
4. Zharkov Yu., Tsytsyliano O. Systemy upravlinnya yakystyu: monitorynh roboty orhaniv z otsinky vidpovidnostiz vykorystannyammetodu Kharinhhtona [Quality management systems: monitoring of of conformity

assessment authorities using the Harrington method]. *Standartyzatsiya, sertyfikatsiya, yakist'*. – *Standardisation, certification, quality*, 2005, no. 1, pp. 24-27.

5. Zharkov Yu., Tsytsyliano O. Optymizatsiya kryteriyiv roboty orhaniv z otsinky vidpovidnosti z vykorystanniammetodu Kharinhona [Optimization the works criteria of conformity assessment authorities using the method Harrington]. *Standartyzatsiya, sertyfikatsiya, yakist'*. – *Standardisation, certification, quality*, 2004, no.4, pp. 36-38.

6. Akhnazarova S. L., Gordeev L. S. *Ispol'zovanie funktsii zhelatel'nosti Kharringtona pri reshenii optimizatsionnykh zadach khimicheskoy tekhnologii* [Using the desirability Harrington function in solving the optimization problems of chemical technology]. Moscow, RHTU Publ., 2003. 76 p.

7. Pichkalev A.V. Obobshchennaya funktsiya zhelatel'nosti Kharringtona dlya sravnitel'nogo analiza tekhnicheskikh sredstv [Generalized desirability function Harrington for the comparative analysis of technical means]. *Issledovaniya naukograda – Research of science city*, 2012, no. 1 (1), pp. 25-28.

8. Fedulova I. Pidkhody do otsinky rivnya hotovnosti pidpryemstva shchodo innovatsiynoho rozvytku [Approaches to the assessment of the readiness of enterprises for innovation development]. *Visnyk Kyivskoho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka* [Bulletin of Kyiv National University named after Taras Shevchenko], 2011, no. 124/125, pp. 36-40.

9. Chayka T. Yu. Problemy formirovaniya integral'nogo pokazatelya konkurentosposobnosti tovarov (uslug) [Problems the formation of the integral index of competitiveness the goods (services)]. *BiznesInform – BusinessInform*, 2014, no. 8, pp. 198 – 204.

10. Akhnazarova S. L., Kafarov V. V. *Statisticheskie metody obrabotki i planirovaniya eksperimentov* [Statistical methods of processing and design of experiments]. Moscow, MHTI Publ., 1972. 65 p.

11. Anokhin A. M., Glotov V. A., Pavel'ev V. V., Cherkashin A. M. Metody opredeleniya koeffitsientov vazhnosti kryteriev [Methods for determination of the coefficients of importance criteria]. *Avtomatika i telemekhanika – Automatics and telemechanics*, 1977, no. 8, pp. 3-35.

12. *Instruktsiya z tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu obladdannya tyahovykh pidstantsiy, punktiv zhyvlennya i sektionuvannya elektryfikovanykh zaliznyts'* [Instructions for maintenance service and repair the equipment of traction substations, power and sectioning points of electrified railways]. Kyiv, Inpress Publ., 2008. 125 p.

УДК 621.331:621.311.4-047.38

Д. В. Миронов, ассистент кафедры Электроснабжение железных дорог,
Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта имени ак. В. Лазаряна

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТО И Р ОБОРУДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОБЩЕННЫХ КРИТЕРИЕВ

Данные, полученные в процессе диагностирования технического состояния силового оборудования, трудно сравнить между собой, и они не всегда удовлетворяют условиям, которые позволили бы обоснованно применить для их анализа статистические методы оценки эксплуатационных показателей. Сложность постановки вывода заключается в том, что по отдельным техническим показателям оборудования или параметрам работы дать субъективную оценку его состоянию практически невозможно. Необходимо определять обобщенные характеристики уровня эксплуатации силового оборудования и проводить их многофакторный анализ. Для решения этой задачи рассмотрена возможность применения функции желательности Харрингтона для оценки технического состояния оборудования тяговых подстанций с учетом многофакторности процесса. На примере быстродействующего выключателя постоянного тока ВАБ-43 проведен расчет обобщенного критерия качества объекта диагностирования.

Предложена методика оценки технического состояния оборудования тяговых подстанций, которая предусматривает использование современных методов диагностики и квалитетрии и позволяет создать систему управления качеством процесса диагностирования, повышает эффективность существующей системы ТО и Р электрооборудования. Использование обобщенного критерия качества объекта диагностирования может служить основой нового метода обработки диагностической информации.

Ключевые слова: тяговая подстанция, диагностирование, техническое обслуживание, функция желательности Харрингтона, многофакторный анализ, стратегия ТО и Р.

Надійшла 02.09.2015

Received 02.09.2015

ЕКОНОМІКА ECONOMY

УДК 621.311.16

М.Т. Стрелков, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

СТАТИЧНА МОДЕЛЬ СКЛАДУ СИСТЕМИ РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Метою статті є аналіз складу цілісної системи ринку електричної енергії на функціональному зрізі. Задля цього в якості формальної моделі об'єкту аналізу використано фрейми «галузь», «ринок» та «інфраструктура». Склад системи першого порядку ринку електричної енергії визначено за результатами ринково-галузевої ідентифікації процесу електропостачання з використанням фреймів «галузь» і «ринок». Фрейм «інфраструктура» інтегровано до загальних понять «виробництво – торгівля – організація», за якими визначено склад системи другого порядку ринку електричної енергії з подальшою декомпозицією її елементів на підсистеми. У підсумку побудовано статичну модель складу системи ринку електричної енергії як складної, організованої надсистеми. Показано відображення між елементами систем першого і другого порядків.

Ключові слова: електроенергетична галузь, ринок електричної енергії, інфраструктура, система, декомпозиція, склад, модель складу, статична модель.

Вступ. Сьогодні питання організації та функціонування ринку електричної енергії як системи продовжують займати центральне місце, оскільки різноманіття типів його внутрішніх і зовнішніх зв'язків допускає множинну розкладань його цілісної системи на підсистеми різних порядків. У той же час, внутрішній устрій будь-якої системи являє собою єдність її складу, організації і структури, серед яких саме склад, як необхідна характеристика системи, визначає її складність. Однак кількість підсистем розкладання та рівнів декомпозиції залежить від сукупності спеціалізованих елементів, які будуть враховані в моделі системи, та кількості мов, які увійдуть до конфігуратора системи.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є проведення аналізу складу цілісної системи ринку електричної енергії з урахуванням її ієрархічності, багатомірності та множинності. Завдання дослідження полягає в побудові статичної моделі складу системи ринку електричної енергії, повної і ненадлишкової у рамках запропонованих підсистем розкладання та рівнів їх декомпозиції. Для цього систему ринку електричної енергії буде розглянуто на функціональному зрізі й розкладено, згідно підібраним формальним моделям об'єкту аналізу, на системи різних порядків з можливою подальшою декомпозицією їх елементів.

Склад системи першого порядку ринку електричної енергії. Технологія виробничого процесу електропостачання, який є нерозривним у часі з процесом споживання електроенергії, нараховує чотири фізично взаємопов'язані виробництва: вироблення, передавання і розподілення електроенергії плюс оперативне управління самим технологічним процесом. Учасниками процесу електропостачання є компанії (фірми), спеціалізовані за виробництвами, сукупність яких утворює електроенергетичну галузь. Електроенергетика, як галузь промисловості, виступає стороною пропозиції на ринку електричної енергії, який, у свою чергу, є економічним механізмом товарно-грошових відносин (взаємодії) між учасниками процесів постачання і споживання електричної енергії. Мікроекономічні границі будь-якого ринку визначаються його товаром або його послугою чи групою товарів або послуг, які є близькими заміниками й призначені для задоволення однієї потреби. Тому електроенергетична галузь є багатопродуктовою виробничою системою, перелік продуктів виробництва якої відповідає переліку виробництв за технологією процесу електропостачання й нараховує один (єдиний) вироблюваний товар (електроенергію) і цілий ряд надаваних послуг фізичного руху (транспортування) цього товару від електрогенеруючих установок виробників до електричних приймачів споживачів [1-2].

Електроенергія є унікальним, дискретно діленим товаром, який немає близьких заміників. Вироблена електрогенеруючими установками електроенергія є продукцією електроенергетичної галузі, відпущена з шин електрогенеруючих установок і продана електроенергія – товаром ринку електричної енергії. Границі товарного ринку електричної енергії, на якому реалізуються комерційні угоди щодо купівлі-продажу одного вироблюваного електроенергетичною галуззю товару, визначаються саме цим єдиним товаром ринку – проданою і купленою електроенергією. Електрична енергія, маючи широкий спектр використання

і призначення, одночасно є однорідним (стандартизованим) товаром, лідером переліку серед доповнюваних товарів, нормальним товаром, товаром першої необхідності, товаром короткочасного використання, товаром як широкого так і промислового призначення. Попит і пропозиція електроенергії є відносно нееластичними за ціною у короткостроковому і довгостроковому періодах часу.

Надавані транспортні послуги передавання і розподілення електричної енергії виступають близькими замінниками, оскільки фізично реалізуються електричними мережами різного класу напруги. Унікальність послуг передавання і розподілення електроенергії підтверджується тим, що на сьогоднішній день не існує конкурентоспроможних технологій безпроводного транспортування електричної енергії. Тому індивідуальні технологічні послуги транспортування електроенергії від електрогенеруючих установок виробників до електричних приймачів споживачів надаються на комерційній основі на ринку послуг передавання і розподілення електричної енергії. Останній, враховуючи географічний принцип транспортування й використовувані механізми ціноутворення, розділяють на ринок послуг передавання електроенергії та ринки послуг розподілення електроенергії. До характерних особливостей товарного руху на ринку електричної енергії відносять одночасність та збалансованість процесів вироблення і споживання електроенергії, неможливість відслідкування фізичного руху електричної енергії від конкретного виробника до конкретного споживача, неможливість повернення й переадресації електроенергії, обмеженість пропускної здатності ліній електричної мережі.

Загальносистемні технологічні послуги, що забезпечують необхідну системну надійність та прийнятну якість процесу електропостачання, купуються і продаються на ринку системних допоміжних технологічних послуг. Системні допоміжні технологічні послуги відрізняються різноманітністю й неоднорідністю, тобто є диференційованими, і загалом утворюють п'ять груп послуг за функціональною ознакою: оперативно-технологічне (диспетчерське) управління електроенергетичною системою; резервування електрогенеруючих потужностей; регулювання частоти, або підтримка балансу активної потужності; регулювання напруги, або підтримка балансу реактивної потужності; запобігання аваріям і післяаварійне відновлення електропостачання.

Ринково-галузева ідентифікація процесу електропостачання, наведена в таблиці 1, дозволяє виділити на ринку електричної енергії три вкладені ринки за продуктовою ознакою – товарний ринок електричної енергії, ринок послуг передавання і розподілення електроенергії, ринок системних допоміжних технологічних послуг. Вкладені ринки мають просторову, часову і цільову організацію, взаємодіють між собою взаємопов'язано, утворюючи тим самим певну єдність (сукупність стійких зв'язків і відношень), яку визначимо як систему першого порядку більш широкої системи ринку електричної енергії, цілісне функціонування якої є результатом взаємодії саме цих виділених ринків. При цьому кожен із системоутворюючих ринків, власна поведінка якого залежить від місця та виконуваних ним функцій в системі, його економічної структури та глибини запровадження державного регулювання, буде обумовлювати певні аспекти поведінки всієї системи першого порядку. Однак її властивості як системи не будуть визначатися простою сумою властивостей утворюючих її ринків. Одночасно ієрархічність взаємодії утворюючих систему першого порядку ринків визначається структурно нерозривним ланцюжком «товар – управління – товарний рух», що підтверджується їх готовністю (здатністю) до ринкових перетворень (структурних змін) в системі ринку електричної енергії, яку відображає послідовність «товарний ринок електричної енергії – ринок системних допоміжних технологічних послуг – ринок послуг передавання і розподілення електроенергії» [3-4].

Таблиця 1 – Ринково-галузева ідентифікація елементів системи першого порядку ринку електричної енергії

Фрейм «галузь»	Фрейм «ринок»
Електроенергетична галузь	Ринок електричної енергії
Технологічні стадії виробничого процесу електропостачання	Складові (вкладені ринки) ринку електричної енергії
Вироблення електричної енергії	Товарний ринок електричної енергії
Передавання і розподілення електричної енергії	Ринок послуг передавання і розподілення електричної енергії
Оперативно-технологічне управління процесом електропостачання	Ринок системних допоміжних технологічних послуг

Оскільки фрейм «ринок» включає обидві сторони попиту і пропозиції, він є ширшим за фрейм «галузь». Тому в якості формальної моделі об'єкту аналізу для достатньої повноти його декомпозиції слід використати фрейм «ринок», який у повній мірі відображає всі суттєві, характерні елементи системи (підсистем) першого порядку властивості. З іншого боку, задля компактності дерева декомпозиції мову

конфігуратора системи слід інтегрувати до загальних понять «рівновага – сторони – суб'єкти». Останні у повній мірі відповідають фрейму «ринок», оскільки є часткою моделі ринкової організації [2].

Системоутворюючим фактором кожної підсистеми першого порядку є потреба в її продуктах, яка задовольняється через зв'язки обміну на її ринку. На товарному ринку – це потреба в електричній енергії як товарі, на ринку послуг передавання і розподілення електроенергії – в індивідуальних послугах, на ринку системних допоміжних технологічних послуг – у загальносистемних послугах. Як наслідок, функціональним призначенням кожного із системоутворюючих ринків, як елементів системи першого порядку, є виявлення економічної цінності (вартості) їх продуктів і відповідного до її значення обсягів їх купівлі-продажу. Останнє досягається за рахунок економічних механізмів взаємодії сторін попиту і пропозиції, рівновага між якими встановлюється за ринковими, мікроекономічними законами.

Сторону попиту утворює сукупність економічних агентів (споживачів), які відокремлено приймають самостійні (незалежні) рішення щодо розподілу свого доходу (домогосподарства) або своїх ресурсів (фірми) на купівлю продукту (продуктів) даного ринку. Сторону пропозиції утворює сукупність економічних агентів (виробників), які відокремлено приймають самостійні (незалежні) рішення щодо розподілу своїх ресурсів (фірми) на вироблення продукту (продуктів) даного ринку. Споживачі та виробники на кожному з ринків можуть бути об'єднані в групи за певними ознаками, властивостями або характеристиками, утворюючи тим самим відповідні сегменти як на стороні попиту, так і на стороні пропозиції. Елементами (учасниками) кожної підсистеми першого порядку є її економічні агенти, або суб'єкти ринку.

Системоутворюючим фактором цілісної системи першого порядку ринку електричної енергії є взаємодоповнюваність її продуктів, оскільки електроенергія як товар, послуги передавання і розподілення електричної енергії та системні допоміжні технологічні послуги є доповнюваними економічними благами, споживацька корисність яких створюється тільки за їх одночасного споживання. Кількість підсистем системи першого порядку є повною, оскільки в системі ринку електроенергії не існує інших товарів і послуг крім зазначених. Як наслідок, система першого порядку ринку електричної енергії складається з трьох підсистем (системоутворюючих ринків) та є мікроекономічною системою.

Склад системи другого порядку ринку електричної енергії. Система ринку електроенергії є цілеспрямованою системою, поведінка якої підпорядкована досягненню певних (визначених) цілей, які, незважаючи на можливі протиріччя, є сумісними й доповнюють одна одну. Останнє виявляє множинність опису системи ринку електричної енергії, яку в цьому випадку доповнює фрейм «інфраструктура» як додаткова формальна модель об'єкту аналізу. Оскільки фрейми «ринок» за визначенням є первинним, а фрейм «інфраструктура» – вторинним, то відповідно говоримо про систему другого порядку більш широкої системи ринку електричної енергії. За такою додатковою формальною моделлю система другого порядку буде являти собою сукупністю складових частин загального устрою більш широкої системи ринку електроенергії. Ці складові частини будуть носити допоміжний характер і будуть забезпечувати, що є функціональним призначенням системи другого порядку, нормальну діяльність в цілому всієї цілісної системи ринку електричної енергії, сприяючи досягненню визначених цілей щодо надійності, якості, ефективності, керованості та розвитку. Виходячи з цього, з метою досягнення компактності дерева декомпозиції, мову конфігуратора системи слід інтегрувати до загальних понять «виробництво – торгівля – організація», які у повній мірі відповідають фрейму «інфраструктура» і дозволяють виділити три підсистеми другого порядку в якості складових частин загального устрою більш широкої системи ринку електроенергії [4-5].

Технологічна підсистема, як елемент системи другого порядку, об'єднує фізично виробників і споживачів продуктів ринку електричної енергії без конкретної прив'язки їх між собою. Існує тільки географічна, вузлова прив'язка в електричній мережі електроенергетичної системи, яка одночасно виступає технічною основою технологічної підсистеми другого порядку. Звідси системоутворюючим фактором технологічної підсистеми є наявність жорстких електричних зв'язків між елементами електроенергетичної системи, які, у свою чергу, забезпечують не тільки її єдність, але й одночасно є її системоозберігаючим фактором. Множину елементів самої електроенергетичної системи утворюють електрогенеруючі установки, трансформатори, передавальні й розподільчі електричні мережі, електричні приймачі, засоби зв'язку, вимірювальні системи й обчислювальні комплекси, пристрої управління та регулювання, і т.п. Сукупності останніх, у свою чергу, утворюють за функціональним призначенням підсистеми (елементи) технологічної системи, до складу якої входять: підсистема генерування, підсистема транспортування, підсистема споживання та підсистема диспетчеризації.

Функціональним призначенням технологічної підсистеми є створення, управління й облік в реальному часі товарних потоків (фізичних перетоків електроенергії) в електроенергетичній системі відповідно з потребами ринку електричної енергії із забезпеченням необхідної системної надійності та прийнятної якості процесу електропостачання. Задля цього функціонування електроенергетичної системи, як сукупності фізичних об'єктів і процесів, потребує відповідності інтегрованих дій усіх учасників технологічної підсистеми (виробників, споживачів, системного оператора, операторів розподільчих

мереж) фізичним законам, що досягається за рахунок централізованого й ієрархічного управління енергосистемою. Розв'язувані для цього учасниками технологічної підсистеми ієрархічні задачі реалізують принцип мінімізації індивідуальних або суспільних затрат за умови збалансованості вироблення і споживання електроенергії з урахуванням її технологічних втрат й обмежень в електричній мережі [5]. Технологічна підсистема, як елемент системи другого порядку ринку електричної енергії, є виробничо-технічною системою, що складається з чотирьох підсистем.

Комерційна підсистема, як елемент системи другого порядку, поєднує продавців, торгових посередників (оптові і роздрібні торговці, оператори торгових систем) і покупців продуктів ринку електричної енергії з конкретно прив'язкою їх між собою завдяки існуючим торговим угодам та укладеним договорам (підписаним контрактам). Оскільки комерційна підсистема являє собою впорядковану систему здійснення операцій купівлі-продажу продуктів ринку електроенергії, її торговою основою є маркетингова система, множину елементів якої складають канали розподілення, рівнями (елементами) яких є учасники комерційної підсистеми. Зв'язки між ієрархічними рівнями каналів розподілення, залежно від форми організації торгівлі, можуть бути організованими (біржова торгівля, спеціалізовані аукціони) або самоорганізованими (позабіржова торгівля, самопризначені договори).

Сукупності певних рівнів каналів розподілення утворюють за метою використання (споживання) продуктів ринку електричної енергії оптовий і роздрібний ринки, які, як елементи, входять до складу підсистеми розповсюдження. При цьому торгівля продуктами ринку електроенергії з урахуванням часу використання (споживання) здійснюється на спотовому і контрактному ринках, які також є складовими елементами підсистеми розповсюдження. Тобто підсистема розповсюдження складається з двох підсистем та є елементом комерційної підсистеми другого порядку. Страхувати цінові ризики учасників комерційної підсистеми дозволяє її контрактна підсистема завдяки існуванню торгових угод, які здійснюються без підписання або через підписання контрактів (укладання договорів). Тому контрактна підсистема складається з ринку фізичного товару (угоди купівлі-продажу без підписання контрактів), ринку фізичних договорів і ринку фінансових контрактів (деривативів). Елементами ринку фізичних договорів є форвардні й опціонні контракти, які передбачають фізичну поставку продуктів ринку електричної енергії. Елементами ринку фінансових контрактів є ф'ючерсні, опціонні та свопові контракти, які не передбачають фізичну поставку продуктів ринку електроенергії.

Системоутворюючим фактором комерційної підсистеми є можливість укладання, обов'язковість виконання й необхідність реалізації торгових угод, завдяки яким утворюються зв'язки обміну та відбувається передача права власності на продукти ринку електричної енергії між учасниками комерційної підсистеми з одночасним страхування їх майбутніх доходів від небажаних цінових коливань. Функціональним призначенням комерційної підсистеми є створення, управління й облік грошових (фінансових) потоків ринку електричної енергії за визначеної часової та прийнятої контрактної організації, що відбувається в рамках торгового і фінансового менеджменту за економічними законами. Розв'язувані задля цього учасниками комерційної підсистеми ієрархічні задачі реалізують принцип максимізації індивідуальних або суспільних вигод за умови збалансованості пропозиції і попиту на продукти ринку електроенергії [5]. Комерційна підсистема, як елемент системи другого порядку ринку електричної енергії, є торгово-фінансовою системою та складається з двох підсистем із подальшою декомпозицією їх елементів (дивись таблицю 2).

Таблиця 2 – Декомпозиція комерційної підсистеми другого порядку ринку електричної енергії

Комерційна підсистема			
Підсистема розповсюдження			
за метою використання		за часом використання	
Оптовий ринок	Роздрібний ринок	Спотовий ринок	Контрактний ринок
Контрактна підсистема			
Ринок фізичного товару	Ринок фізичних договорів	Ринок фінансових контрактів	

Організаційна підсистема, як елемент системи другого порядку, забезпечує через прийняті її учасниками рішення внутрішню упорядкованість і погодженість взаємодії елементів цілісної системи ринку електричної енергії шляхом інформаційних зв'язків між окремими підсистемами (складовими частинами) більш широкій системі ринку електроенергії.

Первинним елементом в ієрархії прийняття рішень організаційної підсистеми є політична підсистема, елементами якої є представники законодавчої влади: парламент, президент, уряд. Політична підсистема, як складова розподілу влади, визначає, відповідно до соціально-економічних і національних інтересів, цілі державної політики у сфері електроенергетики та задачі реформування ринку електричної енергії. Як результат, створюється й приймається відповідна законодавча база щодо організації функціонування та подальшого розвитку ринку електроенергії.

Вторинним елементом в ієрархії прийняття рішень організаційної підсистеми є адміністративна підсистема, елементами якої є представники виконавчої влади: галузеве міністерство, регуляторна комісія, антимонопольний комітет, суди. Адміністративна підсистема, як складова розподілу відповідальності, реалізує в системі ринку електричної енергії механізми державного управління й принципи державного регулювання через встановлювані для цього правила, норми і стандарти та контролює їх виконання, використовуючи спеціально розроблені механізми моніторингу.

Третинним елементом в ієрархії прийняття рішень організаційної підсистеми є поведінкова підсистема, елементами якої є учасники технологічної і комерційної підсистем, враховуючи найближче до них середовище опосередкованого впливу (наприклад, акціонерів, інвесторів, постачальників). Поведінкова підсистема, як складова розподілу ресурсів, проявляє себе через управлінські рішення, незалежно прийняті її учасниками в полі законодавчої, нормативно-правової та договірної бази функціонування ринку електричної енергії, прийнятої, запровадженої і контрольованої, у свою чергу, політичною й адміністративною підсистемами.

Функціональним призначенням організаційної підсистеми є створення, управління та моніторинг інформаційних потоків, які, сприяючи запровадженню конкурентних відносин (механізмів конкуренції) на ринку електричної енергії, підтримують і вдосконалюють інформаційну взаємодію товарних (енергетичних) і грошових (фінансових) потоків як нерозривних процесів у цілісній системі ринку електроенергії. Як результат, управлінські рішення учасниками організаційної підсистеми приймаються на стику фізичних й економічних законів, підґрунтям для чого є суспільні закони. Розв'язувані задля цього учасниками організаційної підсистеми ієрархічні задачі реалізують принцип компромісу між мінімальними суспільними затратами і максимальними суспільними вигодами, які природно входять у протиріччя між собою [5]. Організаційна підсистема, як елемент системи другого порядку ринку електричної енергії, є політико-управлінською системою та складається з трьох підсистем.

Відображення у надсистемі ринку електричної енергії. Як показано в таблиці 3, цілісна система ринку електричної енергії складається з двох систем першого та другого порядку, елементи яких, як наведено вище, допускають подальшу декомпозицію за різних рівнів розкладання. Це дозволяє визначити систему ринку електричної енергії як складну, організовану надсистему. У той же час, враховуючи ієрархічність взаємодії елементів систем першого та другого порядку, їх підсистеми можна розглядати як взаємні відображення, розділяючи їх таким чином на первинні (базові), вторинні (підпорядковані) і надбудовні (охоплюючи) елементи.

Таблиця 3 – Порядкова декомпозиція системи ринку електричної енергії

Надсистема ринку електричної енергії		
Система першого порядку ринку електричної енергії		
Товарний ринок електричної енергії (мікроекономічна система)	Ринок послуг передавання і розподілення електричної енергії (мікроекономічна система)	Ринок системних допоміжних технологічних послуг (мікроекономічна система)
Система другого порядку ринку електричної енергії		
Технологічна підсистема (виробничо-технічна система)		
Комерційна підсистема (торгово-фінансова система)		
Організаційна підсистема (політико-управлінська система)		

За такого контексту товарний ринок електричної енергії можна розглядати як базовий елемент у системі першого порядку, ринок послуг передавання і розподілення електроенергії та ринок системних допоміжних технологічних послуг – її підпорядкованими елементами. Дійсно, обсяги купівлі-продажу товарної продукції визначають необхідні обсяги купівлі-продажу послуг транспортування, які фактично є їх кількісним відображенням. Одночасно, можливі обсяги надавання послуг транспортування можуть обмежувати (впливати на) обсяги купівлі-продажу товарної продукції. Визначення вартості цього «балансу» за такого відображення лягає на ринок системних допоміжних технологічних послуг, який у цьому випадку можна вважати надбудовою до товарного ринку електричної енергії та ринку послуг передавання і розподілення електроенергії.

Подібне можна стверджувати про систему другого порядку, в якій комерційну й організаційну підсистеми можна розглядати як вторинні елементи системи, а технологічну підсистему – як її первинний елемент. При цьому фізичні обсяги товарних потоків у технологічній підсистемі визначають грошові обсяги фінансових потоків у комерційній підсистемі. Відмінність тільки у тому, що обсяги купівлі-продажу за торговими угодами в рамках комерційної підсистеми повинні перевищувати обсяги реальних поставок у рамках технологічної підсистеми, оскільки різниця між ними визначає ліквідність ринку деривативів контрактної підсистеми. Забезпечення необхідного «дисбалансу» обсягів за такого

відображення лягає саме на організаційну підсистему, яку в цьому випадку можна вважати надбудовою до технологічної та комерційної підсистем.

Одночасно з внутрішніми системними відображеннями існують міжсистемні відображення елементів системи ринку електричної енергії. Так товарні потоки технологічної підсистеми другого порядку відповідають фізичній рівновазі, встановленій елементами системи першого порядку. Грошові потоки комерційної підсистеми другого порядку пов'язані з ціновою рівновагою, встановленою елементами системи першого порядку. Інформаційні потоки організаційної підсистеми другого порядку сприяють досягненню ефективної рівноваги, встановленої елементами системи першого порядку. Тому взаємопов'язані елементи системи другого порядку ринку електричної енергії є певним відображенням рівноваги, встановленої взаємопов'язаними елементами системи першого порядку ринку електричної енергії.

Висновки.

1. Система ринку електричної енергії, як цілісна впорядкована сукупність взаємопов'язаних елементів, є організованою та складною надсистемою, склад якої являє собою сукупність двох рівнів співвідпорядкованих систем першого і другого порядку, елементи яких, у свою чергу, є підсистемами, що допускають подальшу декомпозицію.

2. Якщо в якості формальної моделі об'єкту аналізу використати фрейми «галузь» і «ринок», то отримаємо систему першого порядку більш широкої системи ринку електричної енергії, елементами якої є три мікроекономічні підсистеми, а саме: товарний ринок електричної енергії (базовий елемент), ринок послуг передавання і розподілення електричної енергії (підпорядкований елемент), ринок системних допоміжних технологічних послуг (надбудова).

3. Якщо в якості формальної моделі об'єкту аналізу використати фрейм «інфраструктура», то отримаємо систему другого порядку більш широкої системи ринку електричної енергії, елементами якої є три підсистеми загального устрою, а саме: технологічна підсистема (первинний елемент), комерційна підсистема (вторинний елемент), організаційна підсистема (надбудова).

4. Технологічна підсистема є виробничо-технічною системою і складається з підсистеми генерування, транспортування, споживання й диспетчеризації. Комерційна підсистема, як торгово-фінансова система, включає підсистему розповсюдження і контрактну підсистему. Організаційна підсистема є політико-управлінською системою, до складу якої входять політична, адміністративна й поведінкова підсистеми.

Список літератури.

1. Стрелков М.Т. Галузева організація інфраструктури ринку електроенергії / М.Т. Стрелков // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2003. – №1. – С.97-105.
2. Стрелков М.Т. Маркетингові питання реструктуризації електроенергетики / М.Т. Стрелков // Електричні мережі та системи. – 2004. – №5-6. – С.100-104.
3. Стрелков М.Т. Реструктуризація галузевої інфраструктури ринку електричної енергії / М.Т. Стрелков // Енергетика та електрифікація. – 2007. – №9. – С.3-8.
4. Стрелков М.Т. Лібералізація в системі ринку електричної енергії / М.Т. Стрелков // Енергетика та електрифікація. – 2012. – №10. – С.10-17.
5. Стрелков М.Т. Складові інфраструктури системи енергоринку: створювані потоки, реалізовані принципи, розв'язувані задачі / М.Т. Стрелков // Енергетика та електрифікація. – 2014. – №4. – С.51-57.

M.T. Strelkov

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

STATIC MODEL OF ELECTRICITY MARKET SYSTEM COMPOSITION

The purpose of the article is to analyze a composition of the whole electricity market system on the functional level. For the purpose the frames “industry”, “market” and “infrastructure” were used as the formal models of the object analyzed. The composition of the first order electricity market system was defined as a result of market-industry identification of electricity supplying process by using the frames “industry” and “market”. The frame “infrastructure” was integrated to the general concepts “production – trade – organization” to define the composition of the second order electricity market system with subsequent decomposition of its parts on the subsystems. As a result the static model of electricity market system composition was built as a complex organized super system. Reflections among the parts of the first and second order systems were shown.

Keywords: electric industry, electricity market, infrastructure, system, decomposition, composition, composition model, static model.

References

1. Strelkov M.T. Industrial organization of electricity market infrastructure / M.T. Strelkov // Power engineering: economics, technique, ecology. – 2003. – №1. – С.97-105.
2. Strelkov M.T. Marketing questions of electric industry restructuring / M.T. Strelkov // Electrical networks and systems. – 2004. – №5-6. – С.100-104.

3. Strelkov M.T. Restructuring the industrial infrastructure of electricity market / M.T. Strelkov // Energy and electrification. – 2007. – №9. – С.3-8.
4. Strelkov M.T. Liberalization in system of electricity market / M.T. Strelkov // Energy and electrification. – 2012. – №10. – С.10-17.
5. Strelkov M.T. Infrastructure components of electricity market system: created flows, implemented principles, solved problems / M.T. Strelkov // Energy and electrification. – 2014. – №4. – С.51-57.

УДК 621.311.16

М.Т. Стрелков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
СТАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОСТАВА СИСТЕМЫ РЫНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Целью статьи является анализ состава целостной системы рынка электрической энергии на функциональном срезе. Для этого в качестве формальной модели объекта анализа использованы фреймы «отрасль», «рынок» и «инфраструктура». Состав системы первого порядка рынка электрической энергии определен в результате рыночно-отраслевой идентификации процесса электроснабжения с использованием фреймов «отрасль» и «рынок». Фрейм «инфраструктура» интегрирован до общих понятий «производство – торговля – организация», в результате чего определен состав системы второго порядка рынка электрической энергии с последующей декомпозицией ее элементов на подсистемы. В итоге построена статическую модель состава рынка электрической энергии как сложной, организованной надсистемы. Показаны отображения между элементами систем первого и второго порядков.

Ключевые слова: электроэнергетическая отрасль, рынок электрической энергии, инфраструктура, система, декомпозиция, состав, модель состава, статическая модель.

Надійшла 28.06.2015
Received 28.06.2015

ЕКОЛОГІЯ ECOLOGY

UDK 502.33

O.O.Vovk, Dr. Eng. Sc., Prof.
National technical university of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”

STRATEGIES FOR ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION ON TECHNOSPHERE

Methods for environmental problems solving throw a systems approach so that the connections between industrial practices/human activities and environmental / ecological processes can be more readily recognized were analyzed in this article . A systems approach for a holistic view of environmental problems, making them easier to identify and solve were proposed.

Key words: ecologization, life cycle, technosphere, industrial metabolism, environmental strategies.

Introduction

The development of strategies for environmental impact reduction is an attempt to provide a new conceptual framework for understanding the impacts of the technosphere on the environment. This new framework serves to identify and then implement strategies to reduce the environmental impacts of products and processes associated with industrial systems, with an ultimate goal of sustainable development.

It is obviously important to study physical, chemical, and biological interactions and interrelationships both within and between industrial and ecological systems. Additionally, some researchers feel that such attempts should involve identifying and implementing strategies for industrial systems to more closely emulate harmonious, sustainable, ecological ecosystems. One goal is to change the linear nature of our industrial system, where raw materials are used and products, by-products, and wastes are produced, to a cyclical system where the wastes are reused as energy or raw materials for another product or process. Fundamental to solving environmental problems in the technosphere is identifying and tracing flows of energy and materials through various systems. This concept, sometimes referred to as industrial metabolism, can be utilized to follow material and energy flows, transformations, and dissipation in the industrial system as well as into natural systems. The mass balancing of these flows and transformations can help to identify their negative impacts on natural ecosystems. By quantifying resource inputs and the generation of residuals and their fate, industry and other stakeholders can attempt to minimize the environmental burdens and optimize the resource efficiency of material and energy use within the industrial system. Fundamental to industrial ecology is identifying and tracing flows of energy and materials through various systems. This concept, sometimes referred to as industrial metabolism, can be utilized to follow material and energy flows, transformations, and dissipation in the industrial system as well as into natural systems. The mass balancing of these flows and transformations can help to identify their negative impacts on natural ecosystems. By quantifying resource inputs and the generation of residuals and their fate, industry and other stakeholders can attempt to minimize the environmental burdens and optimize the resource efficiency of material and energy use within the industrial system.

Goal and tasks

The primary goal of strategies for environmental impact reduction development is to promote sustainable development at the global, regional, and local levels. Sustainable development has been defined by the United Nations World Commission on Environment and Development as “meeting the needs of the present generation without sacrificing the needs of future generations.”. Key tasks inherent to sustainable development include: the sustainable use of resources, preserving ecological and human health (e.g. the maintenance of the structure and function of ecosystems), and the promotion of environmental equity (both intergenerational and intersocietal). This strategy should promote the sustainable use of renewable resources and minimal use of non-renewable ones. Industrial activity is dependent on a steady supply of resources and thus should operate as efficiently as possible. Although in the past mankind has found alternatives to diminished raw materials, it can not be assumed that substitutes will continue to be found as supplies of certain raw materials decrease or are degraded. Besides solar energy, the supply of resources is finite. Thus, depletion of nonrenewables and degradation of renewables must be minimized in order for industrial activity to be sustainable in the long term. Human beings are only one component in a complex web of ecological interactions: their activities cannot be separated from the functioning of the entire system. Because human health is dependent on the health of the other components of the ecosystem, ecosystem structure and function should be a focus of industrial ecology. It is important that industrial activities do not cause

catastrophic disruptions to ecosystems or slowly degrade their structure and function, jeopardizing the planet's life support system. A primary challenge of sustainable development is achieving intergenerational as well as intersocietal equity. Depleting natural resources and degrading ecological health in order to meet short-term objectives can endanger the ability of future generations to meet their needs. Intersocietal inequities also exist, as evidenced by the large imbalance of resource use between developing and developed countries. Developed countries currently use a disproportionate amount of resources in comparison with developing countries. Inequities also exist between social and economic groups within the world's countries.

Material and research results

Various strategies are used by individuals, firms, and governments to reduce the environmental impacts of industry. Each activity takes place at a specific systems level. Pollution prevention is defined by the U.S. EPA as "the use of materials, processes, or practices that reduce or eliminate the creation of pollutants at the source." Pollution prevention refers to specific actions by individual firms, rather than the collective activities of the industrial system (or the collective reduction of environmental impacts) as a whole. The document in this compendium entitled "Pollution Prevention Concepts and Principles" provides a detailed examination of this topic with definitions and examples. Waste minimization is defined by the U.S. EPA as "the reduction, to the extent feasible, of hazardous waste that is generated or subsequently treated, sorted, or disposed of." Source reduction is any practice that reduces the amount of any hazardous substance, pollutant or contaminant entering any waste stream or otherwise released into the environment prior to recycling, treatment or disposal. Total quality environmental management (TQEM) is used to monitor, control, and improve a firm's environmental performance within individual firms. Based on well-established principles from Total Quality Management, TQEM integrates environmental considerations into all aspects of a firm's decision-making, processes, operations, and products. All employees are responsible for implementing TQEM principles. It is a holistic approach, albeit at level of the individual firm. Many additional terms address strategies for sustainable development. Cleaner production, a term coined by UNEP in 1989, is widely used in Europe. Its meaning is similar to pollution prevention. In *Clean Production Strategies*, Tim Jackson writes that clean production is . . . an operational approach to the development of the system of production and consumption, which incorporates a preventive approach to environmental protection. It is characterized by three principles: precaution, prevention, and integration. *These strategies* represent approaches that individual firms can take to reduce the environmental impacts of their activities. Along with environmental impact reduction, motivations can include cost savings, regulatory or consumer pressure, and health and safety concerns. What environmental strategies potentially offers is an organizing umbrella that can relate these individual activities to the industrial system as a whole. Whereas strategies such as pollution prevention, TQEM, and cleaner production concentrate on firms' individual actions to reduce individual environmental impacts, industrial ecology is concerned about the activities of all entities within the industrial system. The goal of industrial ecology is to reduce the overall, collective environmental impacts caused by the totality of elements within the industrial system.

System Tools to Support strategies for environmental impact reduction

Life Cycle Assessment (LCA)

Life cycle assessment (LCA), along with "eco-balances" and resource environmental profile analysis, is a method of evaluating the environmental consequences of a product or process "from cradle to grave." The Society for Environmental Toxicology & Chemistry (SETAC) defines LCA as "a process used to evaluate improvement analysis — evaluation and implementation of opportunities to reduce environmental burden. Some life cycle assessment practitioners have defined a fourth component, the scoping and goal definition or initiation step, which serves to tailor the analysis to its intended use. Other efforts have also focused on developing streamlined tools that are not as rigorous as LCA (e.g., Canadian Standards Association.)

Methodology

A Life Cycle Assessment focuses on the product life cycle system. Most research efforts have been focused on the inventory stage. For an inventory analysis, a process flow diagram is constructed and material and energy inputs and outputs for the product system are identified and quantified. The U.S. EPA has stated that an LCA "is a tool to evaluate the environmental consequences of a product or activity holistically, across its entire life."

Components of an LCA

LCA methodology is still evolving. However, the three distinct components defined by SETAC and the U.S. EPA are the most widely recognized:

1. inventory analysis — identification and quantification of energy and resource use and environmental releases to air, water, and land
2. impact analysis — technical qualitative and quantitative characterization and assessment of the consequences on the environment

Regardless of the current limitations, LCAs offer a promising tool to identify and then implement strategies to reduce the environmental impacts of specific products and processes as well as to compare the relative merits of

product and process options. However, much work needs to be done to develop, utilize, evaluate, and refine the LCA framework.

Life Cycle Design (LCD) and Design For the Environment (DfE)

The design of products shapes the environmental performance of the goods and services that are produced to satisfy our individual and societal needs. Environmental concerns need to be more effectively addressed in the design process to reduce the environmental impacts associated with a product over its life cycle. Life Cycle Design, Design for Environment, and other similar initiatives based on the product life cycle are being developed to systematically incorporate these environmental concerns into the design process. Life Cycle Design (LCD) is a systems-oriented approach for designing more ecologically and economically sustainable product systems. Coupling the product development cycle used in business with a product's physical life cycle, LCD integrates environmental requirements into each design stage so total impacts caused by the product system can be reduced. Design for Environment (DfE) is another design strategy that can be used to design products with reduced environmental burden. DfE and LCD can be difficult to distinguish. They have similar goals but evolved from different sources. DfE evolved from the "Design for X" approach, where X can represent manufacturability, testability, reliability, or other "downstream" design considerations. Braden Allenby has developed a DfE framework to address the entire product life cycle. Like LCD, DfE uses a series of matrices in an attempt to develop and then incorporate environmental requirements into the design process. DfE is based on the product life cycle framework and focuses on integrating environmental issues into products and process design. Life cycle design seeks to minimize the environmental consequences of each product system component: product, process, distribution and management. When sustainable development is the goal, the design process can be affected by both internal and external factors. Internal factors include corporate policies and the companies' mission, product performance measures, and product strategies as well as the resources available to the company during the design process. For instance, a company's corporate environmental management system, if it exists at all, greatly affects the designer's ability to utilize LCD principles. External factors such as government policies and regulations, consumer demands and preferences, the state of the economy, and competition also affect the design process, as do current scientific understanding and public perception of risks associated with the product.

The needs analysis

As shown in the figure, a typical design project begins with a needs analysis. During this phase, the purpose and scope of the project is defined, and customer needs and market demand are clearly identified. The system boundaries (the scope of the project) can cover the full life cycle system, a partial system, or individual stages of the life cycle. Understandably, the more comprehensive the system of study, the greater the number of opportunities identified for reducing environmental impact. Finally, benchmarking of competitors can identify opportunities to improve environmental performance. This involves comparing a company's products and activities with another company who is considered to be a leader in the field or "best in class."

Design requirements

Once the project's needs have been established, they are used in formulating design criteria. This step is often considered to be the most important phase in the design process. Incorporating key environmental requirements into the design process as early as possible can prevent the need for costly, time-consuming adjustments later. A primary objective of LCD is to incorporate environmental requirements into the design criteria along with the more traditional considerations of performance, cost, cultural, and legal requirements.

Conclusions

As we struggle with what the appropriate levels of Ukrainian technosphere ecologization should be, we are faced with the fundamental question of whether our policy designed to create a pristine domestic environment through continued and increasing reliance on other regions of the world for heavy industrial activity is ethically and morally defensible. It is perhaps easy to conclude, in the absence of global or comprehensive thinking, that domestic harvest levels should be significantly reduced. Consideration of raw material options, and associated environmental impacts logically leads, however, to a much different conclusion. When seeking to protect the environment, the lack of a global perspective can and does lead to what amounts to irresponsible and unethical regional environmentalism. As we enter what has been called a new era of ecoeconomy, we need to totally rethink our positions and approach to environmental issues with a global and comprehensive view. To do otherwise will ill serve both the world's environment and its people. While environmental assimilative capacity varies greatly from one location to another, some broad emission and discharge target guidelines are given as a starting point for project design. The use of specific project design criteria can help to confirm that all relevant actions have been taken to minimize environmental impact. Within the operating company environmental control must become a priority to be managed rather than an unwelcome nuisance to be attended to when problems start to appear. Effective control only occurs when corporate management adopts environmental performance goals and a suitable management structure from the outset.

References

1. Ayres, Robert V. 1988. "Self Organization in Biology and Economics." *International Journal on the Unity of the Sciences 1, no. 3.*

2. Ayres, Robert U., and Allan V. Kneese. 1969. "Production, Consumption and Externalities." *American Economic Review* 59, no. 3: 282-296.
3. 1989. "Externalities: Economics and Thermodynamics." In: F. Archibugi and P. Nijkamp, eds., *Economy and Ecology: Towards Sustainable Development*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
4. Georgescu-Roegen, Nicholas. 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
5. Nriagu, J. O. 1990. "Global Metal Pollution." *Environment* 32, no. 7: 7-32.
6. Rogner, Hans-Holger. 1987. "Energy in the World: The Present Situation and Future Options." In: *Proceedings of the 17th International Congress of Refrigeration August 24-28, 1987*.

УДК 502.33

О.А. Вовк, д-р техн. наук, проф.

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
СТРАТЕГИИ СНИЖЕНИЯ ЭКОЛОГИЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕХНОСФЕРУ**

В статье были проанализированы методы решения экологических проблем при использовании системного подхода, для выявления и определения взаимосвязей между промышленной деятельностью/ деятельностью человека и окружающей среды / экологических процессов. Был предложен системный подход для холистического представления экологических проблем с целью упрощения их идентификации и решения.

Ключевые слова: экологизация, жизненный цикл, техносфера, индустриальный метаболизм, экологические стратегии.

УДК 502.33

О.О. Вовк, д-р техн. наук, проф.

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
СТРАТЕГІЇ ЗНИЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ НА ТЕХНОСФЕРУ.**

У статті були проаналізовані методи вирішення екологічних проблем при використанні системного підходу, для виявлення та визначення взаємозв'язків між промисловою діяльністю / діяльністю людини і навколишнього середовища / екологічних процесів. Був запропонований системний підхід для холистичного уявлення екологічних проблем з метою спрощення їх ідентифікації і рішення.

Ключові слова: екологізація, життєвий цикл, техносфера, індустріальний метаболізм, екологічні стратегії.

Надійшла .15. 09.2015
Received 15.09.2015

«ЕНЕРГЕТИКА: ЕКОНОМІКА, ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ»

Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія» – фахове видання, що надає вченим, дослідникам і фахівцям-практикам можливість викладати результати своїх наукових досліджень в галузі енергетики і енергозбереження, економіки та екології.

У виданнях журналу представлені питання, які стосуються систем енергетики, електро-теплопостачання і електротеплоспоживання, а також джерел як традиційної, так і не традиційної генерації, зокрема – відновлюваних джерел, питанням перетворення, передавання, розподілення енергії та енергоспоживання. Також присутні важливі для всього людства питання щодо пом'якшення впливу змін клімату.

Значна увага приділяється економічному обґрунтуванню інвестиційної привабливості енергетичних проектів та заходів, зокрема, схем їх фінансування та ефективності впровадження, формування й оптимізації різних варіантів, систем прийняття рішень, з урахуванням можливих ризиків.

Основними засадами редакційної політики є: актуальність, достовірність, обґрунтованість, наукова новизна, інноваційність у статтях видання. Тематика рукописів, які подаються до друку, має відповідати науковим напрямам журналу. Статті не повинні мати характер відкритої чи прихованої реклами (антиреклами). Редакція залишає за собою право редагувати надіслані рукописи з метою забезпечення відповідності текстів граматичним, орфографічним, стилістичним нормам та правилам.

Автор(и), надаючи рукопис для публікації, автоматично підтверджує, що поданий рукопис надається для опублікування вперше, є результатом власних досліджень, а будь-яке використання у цих рукописах досліджень інших осіб чи інформації з інших джерел оформлено відповідно до чинних вимог законодавства України та міжнародної практики. Рукописи приймаються до публікації тільки у разі якщо, автор(и) згоден(ні) на відкритий доступ до його статті через мережу Інтернет: через web-сайт журналу <http://energy.iee.kpi.ua>, інформаційний ресурс Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського «Наукова періодика України», Електронний архів НТУУ «КПІ», наукометричні бази даних та портали закордонних наукових бібліотек.

Усі рукописи, що подаються до публікації, проходять дворівневу систему рецензування: внутрішню та зовнішню.

Порядок розгляду рукописів:

1) Рукопис приймається редколегією до розгляду тільки за умови відповідності його оформлення чинним вимогам МОН України, державним та міжнародним стандартам, та вимогам до оформлення статей у журналі. Рукопис може бути відхилений чи відправлений на доопрацювання у разі невідповідності вищезазначеним вимогам.

2) Рукопис попередньо розглядає редакційна колегія.

3) Редколегія направляє рукопис на обов'язкове незалежне рецензування.

4) Тільки після остаточного узгодження всіх питань стосовно змісту рукопису, він вважається прийнятним до опублікування.

5) Редколегією вирішується питання щодо включення рукопису у відповідний номер журналу, про що повідомляється авторіві.

Редакційна колегія журналу «Енергетика: економіка, технології, екологія» прагне до того, щоб видання становило інтерес не лише для науковців України, але також і зарубіжних країн. Тому редакційна колегія заохочує публікації, наданні авторами з інших країн, а також колективами авторів, що складаються як з українських, так і з закордонних вчених.

Для інтеграції результатів наукових досліджень, поданих у журналі, до світової науки редакційна колегія здійснює процес реєстрації видання у закордонних наукометричних базах даних.

Редакційна колегія заохочує до публікації молодих вчених, які здійснюють інноваційну науково-дослідну роботу у галузі енергетики.

Редакційна колегія підтримує політику відкритого доступу, тому на web-сайті видання представлено постатейно архів журналу, починаючи з 2004 року, у відкритому форматі Portable Document Format (pdf). Кожний новий випуск журналу паралельно з друкованою версією з'являється на сайті видання без ембарго (затримки).

У рамках редакційної політики науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія» послідовно дотримується видавничих стандартів публікації COPE Code of Conduct, затверджених COP (Committee on Publication Ethics).

Право інтелектуальної власності на результати наукових досліджень, поданих у вигляді рукопису до редколегії, належить авторам статті. У випадку виявлення плагіату відповідальність несуть автори наданих матеріалів. Висловлені у статтях думки та пропозиції не обов'язково збігаються з точкою зору редакційної колегії. Відповідальність за достовірність інформації у статтях, точність назв, статистичних даних, прізвищ та цитувань несуть автори. Всі питання та зауваження стосовно діяльності журналу необхідно надсилати на адресу електронної або звичайної пошти редколегії.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для публікації в журналі "Енергетика: економіка, технології, екологія" приймаються статті, надруковані на стандартних аркушах паперу А4 (в 2-х примірниках), що супроводжуються електронною версією (Microsoft Word 2003 або 2007) на CD/DVD дисках, USB-флеш накопичувачах або надіслані електронною поштою.

Мова статті обирається автором. Параметри сторінки: поля верхні, нижні, ліві та праві – 2,5 см. Вирівнювання основного тексту – за шириною. Перші рядки всіх абзаців – з відступом 0,6 см, шрифт Times New Roman, кегль 10, інтервал 1. Назва статті друкується великими напівжирними літерами – кегль 14. Заголовки елементів основного тексту виділяються напівжирним шрифтом.

Структура статті: 1) номер УДК (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом); 2) ініціали, прізвища авторів (великими літерами) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання, посада, повна назва організації, адреса організації) - вирівнювання за правим краєм; 3) назва статті (у центрі); 4) реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки, ключові слова (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним; 5) основний текст статті; 6) перелік літератури; 7) п.2, 3, 4, 6 – англійською мовою; 8) номер УДК, п.2,3,4 російською/українською, якщо основний текст представлено українською/російською мовою.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи: **Вступ** (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття); **Мета та завдання** (формулювання цілей статті, постановка завдання); **Матеріал і результати досліджень** (виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів з можливим підлоєм його на частини з відповідними назвами); **Висновки** (зазначити основні висновки з даного дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

Для надання відомостей про авторів англійською мовою слід використовувати загальноприйняту лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад та місця роботи. **Англомовна анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську)**, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

Обсяг статті, включаючи текст, таблиці, рисунки, не має перевищувати 6–8 сторінок. **Сторінки повністю заповнені текстом**. Схеми, рисунки й таблиці повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати такі елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули. Стаття має бути ретельно перевірена та підписана всіма авторами.

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у чорно-білому зображенні разом із текстом, у місцях посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів: будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом**. Рисунок має бути розташований у центрі, без обтікання текстом. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка.

Формули в статтях мають бути набрані за допомогою редактора формул (внутрішній редактор формул у Microsoft Word). Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери - похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою.

Список літератури наводиться в порядку посилань у тексті відповідно до ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках. Список використаних джерел подається двічі: мовою оригіналу й англійською. У англомовному списку літератури (References) прізвища та назви журналу, видавництва подаються згідно з правилами транслітерації, відповідно до Постанови КМУ від 27 січня 2010 р. №55 (для української мови) або вимогам системи BGN/HCGN (для російської мови). **Назви статті, книги перекладаються англійською мовою**.

В окремому файлі надаються відомості про авторів: прізвище, ім'я та по-батькові повністю, науковий ступінь, вчене звання, посада, місце роботи (повна назва організації без скорочень, адреса, місто, країна), контактні телефони та електронна пошта

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити скорочення та редакційну правку статей.

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" не розглядаються.

Контакти: тел. (38-044) 406-85-14, <http://energy.iee.kpi.ua>, e-mail: krav@iee.kpi.ua