

ISSN 1813-5420

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№1–2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 1 (59) - 2020

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Smart Grid системи та технології
Енергетичні системи та комплекси
Моніторинг, діагностика та керування енергетичними процесами та
обладнанням
Енергетична ефективність та енергозбереження
Екологічні проблеми в енергетиці

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

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

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: А.О. Авраменко, Б.І. Басок, О.Ф. Буткевич, О.О. Вовк,
(Україна) А.В. Волошко, Г.О. Воропаєв, В.І. Дешко, В.Я. Жуйков,
С.О. Кудря, А.В. Носовський, М.Я. Островерхов,
С.М. Пересада, В.А. Попов, К.К. Ткачук, В.О. Туз,
О.Ю. Черноусенко, С.П. Шевчук, В.Ф. Шинкаренко

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард Стржелецькі (*Інститут електротехніки, Варшава, Польща*), П.Я. Екель (*Папський католицький університет Мінас Жерайс, Бразилія*), А.В. Кузнецов (*Університет штату Північна Кароліна, США*), В.І. Олещук (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), О.В. Кузнецов (*Університет прикладних наук, Німеччина*), Карлос Ф. Пфайфер (*Університетський коледж Південно-Східної Норвегії*), А. Башкіс (*Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва*), Опітс Йоакім (*Інститут енергетики м. Хамм, Німеччина*), В.М. Постолатий (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), Рошан Шарма (*Університет Південно-Східної Норвегії*).

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 №22857-12775ПР від 14.06.2017 р.

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до наказу МОН України № 1188 від 24 вересня 2020 р. Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, електронного архіву наукових матеріалів ELAKPI. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (протокол № 7 від 9 листопада 2020 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка О.С. Іщенко.

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: kravkpi@ukr.net

Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського Видавництво «Політехніка»,
м.Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15.

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

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE
“IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 1 (59) – 2020

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Smart Grid system of ta technologies
Energy systems and complexes
Monitoring, diagnostics and management of energy processes and
equipment
Energy efficiency and energy savings
Environmental problems in energy

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2020

Editor-in-chief Yu.I. Yakymenko

Deputy editors-in-chief S.P. Denysiuk, O.S. Yandulskyi, E.M. Pysmennyi

Deputy O.O. Zakladnyi

EDITORIAL BOARD: (Ukraine) A.O. Avramenko, B.I. Basok, O.F. Butkevych, O.O. Vovk, A.V. Voloshko, G. Voropaiev, V.I. Deshko, V.Ya. Zhuykov, S.O. Kudrya, A.V. Nosovsky, M.Ya. Ostroverkhov, S.M. Peresada, V.A. Popov, K.K. Tkachuk, V.O. Tuz, O. Yu. Chernousenko, S.P. Shevchuk, V.F. Shinkarenko

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*), A.V. Kuznetsov (*North Caroline State University, USA*), V. Oleschuk (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), O. Kuznetsov (*University of Applied sciences, Germany*), Carlos F. Pfeiffer (*University College of Southeast Norway*), A. Baskys (*Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*), Opitz H. Joachim (*EIH Energy Institute Hamm, Germany*), V. Postolati (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), Roshan Sharma (*University of South-Eastern Norway*).

Technical secretary N.O. Kravchuk

Website of the journal <http://energy.kpi.ua>

Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media series KB №22857-12775IIP dated 14 June 2017

The Journal was registered approved by order of MES of Ukraine № 1188 of September 24, 2020 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, Djerelo, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (protocol № 7 on November 09, 2020).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing O. Ishchenko.
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: kravkpi@ukr.net

The publisher Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ.hous "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**

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020

ЗМІСТ

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

- С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янюк, Д.С. Горенко.** Особливості оцінювання режимів функціонування локальних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами..... 7
- В.А. Попов, Д.В. Яценко, О.В. Адашкін, О.В. Яценко.** Особливості використання комутаційних апаратів з дистанційним керуванням в процесі формування активних розподільних мереж..... 21

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

- Д.В. Філянін, А.В. Волошко.** Аналіз методів визначення джерел гармонічних спотворень в електричній мережі..... 29
- В.П. Калінчик, В.А. Побігало.** Пристрій керування обмеженням струмів короткого замикання для підвищення ефективності електропостачальних виробничих систем..... 39
- С.В. Зайченко, В.О. Шаленко, С.В. Король, С.П. Шевчук.** Визначення основних енергосилових параметрів пристроїв для очищення магістральних трубопроводів з роликівим приводом..... 47

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

- Д. С. Матушкін, А. В. Босак, Л. Я. Кулаковський, В. Г. Дубовик, С. Л. Прядко.** Моделювання системи керування тяговим електроприводом руління літака з адаптивним нечітким регулятором..... 53

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

- М.М. Вознюк, Є.М. Письменний, О.М. Терех, В.Ю. Ліщишин, Д.В. Конько.** Аналіз економічної ефективності використання плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги..... 60
- В.І. Трофімчук, В.І. Савельєв.** Аналіз методів оцінки економічного ефекту від впровадження проектів енергетичної ефективності..... 68
- М.Ф. Боженко, О.В. Озеруга.** Порівняльні характеристики утилізаційних установок димових газів котелень зі зволоженням дуттьового повітря..... 79

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

- Д.П. Науменко, Т.В. Гребенюк, О.О. Закладний, В.О. Броницький.** Аналіз можливості застосування водяного горіха як альтернативного палива для котелен..... 90
- Т.В. Дикун, Л.І. Гаєва, Ф.В. Казак, Я.М. Дем'янчук.** Аналіз роботи автотранспорту на біогазі в гірських умовах експлуатації..... 97
- Вимоги до оформлення статей..... 104

CONTENTS

SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

- S. Denysiuk, D. Derevyanko, D. Horenko.** Modes evaluation features in local power systems with distributed generation and storage 7
- V. Popov, D. Yatsenko, A. Adanikov, O. Yatsenko.** Features of using remote control switching devices in the process of forming active distribution network 21

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- D. Filyanin, A. Voloshko.** Analysis of harmonic distortion sources identification methods in distribution systems 29
- V. Kalinchyk, V. Pobigaylo.** Short circuit current control device to increase the efficiency of power supply systems 39
- S. Zaichenko, V. Shalenko, S. Korol, S. Shevchuk.** Determination of the main power parameters of devices for cleaning of main pipelines with a roller drive 47

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

- D. Matushkin, A. Bosak, L. Kulakovskiy, V. Dubovyk, S. Priadko.** Modeling of aircraft steering control system with traction electric drive by used an adaptive fuzzy controller 53

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

- M. Vozniuk, E. Pis'mennyi, A. Terekh, V. Lishchyshyn, D. Konko.** Analysis of economic efficiency of using flat-oval tubes with incomplete finning in conditions of natural draft 60
- V. Trofimchuk, V. Saveliev.** Analysis of assessing methods for the economic effect of energy efficiency projects implementation 68
- M. Bozhenko, O. Ozeruha.** Comparative characteristics of utilization installations of flue gases of boilers with humidification of air 79

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

- D. Naumenko, T. Hrebenuk, O. Zakladnyi, V. Bronytskyi.** Analysis of use of trapa natans as alternative fuel for boiler 90
- T. Dykun, L. Haieva, F. Kozak, Ya. Demianchuk.** Biogas as an alternative fuel for automotive transport in mountain areas 97
- Requirements for the articles 104

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

УДК 621.314

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680
Д.Г. Дерев'янюк, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-4877-5601
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Д.С. Горенко, викладач, ORCID 0000-0002-7879-7801
Васильківський фаховий коледж
Національного авіаційного університету

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТА НАКОПИЧУВАЧАМИ

Розглянуто структуру локальних електроенергетичних систем з джерелами Розосередженої Генерації. Представлено основні моделі зазначених систем. Представлено детальну класифікацію ланки генерації локальних електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації котра містить основні характеристики генераторів. Проаналізовано різноманітні засоби накопичення електроенергії та особливості їх застосування. Виокремлено основні типи накопичувачів, котрі містять пристрої накопичення електричної енергії з використанням конденсаторів та суперконденсаторів, пристрої механічного накопичення енергії, пристрої накопичення хімічної енергії, пристрої зберігання теплової енергії. Ретельно проаналізовано енергетичні процеси у електроенергетичних системах з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами електричної енергії шляхом оцінювання величин та знаків обмінних потужностей у перетинах цих систем. Серед вищевказаних процесів: несинусоїдні режими у перетинах локальних електроенергетичних системах та відхилення частоти при синусоїдних та несинусоїдних режимах роботи. Для оптимізації енергетичних процесів у зазначених системах запропоновано метод візуального відображення технічних та економічних показників, котрий дає змогу комплексно оцінити системи з джерелами розосередженої генерації та різноманітними накопичувачами електричної енергії та процеси в них. Враховуючи особливості структури та процесів функціонування систем з джерелами розосередженої генерації обрано такі критерії, як економічна складова вартості елементів системи, її доступність у зазначеному регіоні, екологічність та термін служби. Для поєднання технічних та економічних критеріїв запропоновано використовувати їх графічне відображення

Ключові слова: розосереджена генерація, локальні електроенергетичні системи, Microgrid, накопичувачі електроенергії, енергетичні процеси

1. Вступ

Розвиток сучасних електроенергетичних систем характеризується комбінацією централізованої та розосередженої архітектури. Кожна з систем з відмінним типом архітектури може працювати ізольовано одна від одної або разом в інтегрованих енергетичних системах. Керування процесами у таких системах здійснюється в режимі реального часу шляхом впровадження інтелектуальних систем керування. Розширення технологій розосередженої генерації (РГ) сприяє створенню нових електроенергетичних систем. У таких системах різноманітні джерела генерації працюють у тандемі. Це дає змогу забезпечити умови сумісного функціонування широкого спектру споживачів, котрі не можуть бути забезпечені надійним та безперебійним живленням від централізованої системи або розосереджених технологій окремо. Такі системи характеризуються багаторівневою, інколи складною, структурою. Особливістю функціонування таких систем є те, що зазвичай графіки генерування та споживання в них не співпадають, а задля забезпечення енергетичного балансу та економічної доцільності їх функціонування слід використовувати різноманітні накопичувачі.

Тому актуальною є задача оптимального вибору структури зазначених систем та режимів функціонування їхніх структурних елементів, з урахуванням особливостей функціонування джерел РГ.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Як зазначено у вступі, розглядаючи електроенергетичні системи з різною архітектурою слід зауважити, що найбільшого розповсюдження джерела РГ зазнали у рамках невеликих локальних електро-

енергетичних систем (ЛЕС) з розосередженою архітектурою, відомих на заході як Microgrid системи [1-9].

Поява нових елементів генерування (джерела РГ) та накопичення електричної енергії (котрі можуть працювати у режимі генерування) у електроенергетичних системах змінюють класичні підходи до оцінювання режимів. Причиною цього є об'єктивні труднощі при використанні класичних методів, пов'язані у зазначених системах з появою двосторонніх потоків потужності котрі були повністю відсутні у класичних системах.

Впровадження джерел РГ характеристика наведена у табл. 1, впливає на ланки розподілу та перетворює їх на активні елементи. Це призводить до необхідності внесення змін (або перегляду та модернізації) у прийнятті стратегії керування, експлуатації та планування структури та режимів ЛЕС [10, 11]. При цьому вплив може мати як позитивний, так і негативний характер, тому доцільно ретельно аналізувати питання приєднання джерел РГ до ЛЕС.

Таблиця 1 - Характеристики джерел РГ на основі НВДЕ

Характеристика	СЕС	ВЕС	МГЕС	Паливні комірки	ГТУ	ПГУ	ДГ
Наявність	Залежно від географ. положення	Залежно від географ. положення	Залежно від географ. положення	Завжди	Завжди	Завжди	Завжди
Вихідний сигнал	Постійний струм	Постійний / змінний струм	Змінний струм	Постійний струм	Змінний струм	Змінний струм	Змінний струм
Керування	Некерований	Некерований	Некерований	Керований	Керований	Керований	Керований
Перетворювач	Перетворювач типу (DC-DC-AC)	Перетворювач типу (AC-DC-AC)	Синхронний або асинхронний генератор	Перетворювач типу (DC-AC)	Немає	Немає	Немає
Вид палива	Енергія Сонця	Енергія вітру	Енергія річок	Енергія хімічних реакцій	Природний та біогаз	Природний та біогаз	Продукти нафтопереробки
ККД	6–20%	1–35%	92–94%	до 85 %	30–45%	20–40%	30–45%
Встановл. потужність	до 1 МВт	0,1-2,5 МВт	до 10 МВт	5 кВт – 5 МВт	0,1-30 МВт	30 кВт – 10 МВт	до 6 МВт
Можливість роботи по графіку	Обмежено	Обмежено	Можливо	Можливо	Можливо	Можливо	Можливо
Рівень ПГ	Немає	Немає	Немає	Немає	Високий	Високий	Високий

Разом з тим, залишається невирішеними питання, пов'язані з аналізом структури та процесів у зазначених системах [1, 3, 6, 7]. Ці питання обумовлені появою нових структурних елементів [3, 4] та особливістю режимів їх функціонування [7, 9].

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами шляхом розробки та впровадження способу комплексного оцінювання структури та енергетичних процесів у зазначених системах.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. провести детальний аналіз структури локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої

генерації та накопичувачами;

2. проаналізувати особливості застосування та види накопичувачів у локальних системах з джерелами розосередженої генерації;

3. спираючись на структурні особливості локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами, запропонувати спосіб оцінювання енергетичних процесів у зазначених системах;

4. розробити спосіб комплексного оцінювання локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами.

4. Аналіз структури локальних електроенергетичних систем з різнотипними джерелами РГ та накопичувачами

Більшість джерел РГ під'єднані до мережі за допомогою перетворювачів роду стуму (їхня характеристика наведена у табл. 2). При підключенні ці перетворювачі повинні забезпечувати необхідну якість електричної енергії. Тим не менш, висока частота перемикання вентиляційних елементів в перетворювачах може зумовлювати додаткові гармоніки напруги та струму в ЛЕС та знижувати якість електричної енергії [11–15].

Ланка автономного живлення в ЛЕС на основі джерел РГ, як складова ланки генерації, зазвичай представлена кількома джерелами обмеженої потужності. Її призначення, – робота у відокремленому від загальної мережі режимі, що зазвичай викликає необхідність проводити накопичувальні дії для забезпечення енергетичного балансу:

$$\sum_{i=1}^n W_{Gi} = \sum_{j=1}^m W_{ЛН j}.$$

У деяких джерелах малої потужності, таких як паливні елементи і мікротурбіни, накопичуючі пристрої стають дуже важливими для збалансування потужності системи при незначних коливаннях та/або значних змінах навантаження [11]. У разі раптової зміни стану системи, ці пристрої можуть працювати у якості джерела змінної напруги. В силу своїх фізичних обмежень вони мають обмежений запас енергії, тому до складу ЛЕС повинні бути додані резервні накопичувачі енергії для забезпечення безперервного електропостачання та підвищення рівня надійності.

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} + \sum_{k=1}^t P_{Нк} = \sum_{j=1}^m P_{ЛН j}.$$

Основними технічними засобами акумуляції електричної енергії є:

Гідроакумулювальні електростанції (ГАЕС, Pumped-storage hydroelectricity (PSH), або pumped hydroelectric energy storage (PHES)).

Системи акумулювання такого типу можуть використовуватися у комплексі з вітротурбінними установками [16]. Даний тип систем накопичення (PSH) зберігає енергію механічно. Електроенергія споживається для нагнітання води з нижнього резервуара у верхній резервуар і за необхідності генерується при протіканні води через турбіни у нижній резервуар, подібно до традиційних гідроелектростанцій.

Насосні гідроакумулювальні PSH системи є загальновідомими технологіями накопичення електричної енергії та знайшли широке застосування в Європі. На даний момент, дуже мало насосних гідроакумулюючих установок, які підключені до розподільної мережі в Європі. В майбутньому їх кількість не буде значно зростати, тому що капітальні витрати вищі порівняно з іншими електростанціями, що працюють на природному газі, і необхідні дуже специфічні географічні вимоги.

Середнє значення потужності ГАЕС (PSH) становить близько 1000 МВт (100 МВт – 3000 МВт). ГАЕС (PSH) можна вважати найпопулярнішими серед усіх типів накопичувачів електричної енергії, у тому числі і в системах з джерелами РГ. Це викликано тим, що можливість регулювання вихідних параметрів ГАЕС дає змогу застосовувати ці технології для збалансування графіку навантаження, регулювання частоти та забезпечення резервів потужності [16].

Системи накопичення енергії зі стисненим повітрям (Compressed-air energy storage /CAES).

У системах накопичення енергії зі стисненим повітрям (CAES) енергія зберігається механічно, шляхом запуску електродвигунів для стиснення повітря в закритих об'ємах (при чому виділяється значна кількість теплової енергії). Є три типи систем CAES залежно від того, як вони використовують теплову енергію: адіабатичні, діабатичні та ізотермічні або квазі-ізотермічні.

Середнє значення потужності для CAES систем знаходиться в діапазоні 50–300 МВт [16–17].

CAES накопичує теплову енергію під час стиснення та повертає її, нагріваючи повітря, коли воно

переходить на впускний отвір турбіни. Інший підхід передбачає стиснення та розширення повітря через це температура підтримується фактично сталою. Основними перешкодами для розповсюдження даної технології є високі капітальні витрати та специфічні вимоги до місця розташування. Також дуже часто для компресорів потрібне первинне джерело палива, таке як природний газ. Технології CAES є більш поширеними в США.

Таблиця 2 - Характеристика системи перетворення в ЛЕС з джерелами РГ да основі пристроїв СЕ

Тип перетворення*	Призначення	Вид перетворювача	Галузь застосування
AC-AC	Коригування рівня вихідної напруги змінного струму у відповідності з рівнем вхідної напруги змінного струму. Змінний кут включення вентиля контролює вихідну напругу. Ці перетворювачі відомі як регулятори напруги змінного струму.	Циклоконвертори, гібридні матричні перетворювачі, матричні перетворювачі, перетворювачі частоти, перетворювачі-регулятори напруги	СК Освітлення /Опалення, двигуни великої потужності, зміна рівня напруги / частоти,
AC-DC	Перетворювач параметрів змінного струму в постійний може перетворювати змінну напругу в напругу постійного струму. Вихідна напруга постійного струму може регулюватися шляхом зміни кута запалювання тиристорів. Вхідна напруга змінного струму може бути одно- або трифазною.	Випрямлячі (одно- або трифазний, напівмостовий або мостовий)	Машини постійного струму, сис-ми накопичення енергії, джерела РГ, лінії передачі ПС (HVDC)
DC-AC	Різні рівні вихідної змінної напруги, частоти і фази; регулювання потужності в залежності від конструкції конкретного пристрою та вхідної потужності на стороні постійного струму	Інвертор (інвертор струму, інвертор напруги, резонансний інвертор)	Двигуни змінного струму, UPS, локомотиви, Static Var Generation, СЕС або паливні комірки
DC-DC	Такі перетворювачі використовуються для регулювання вихідної напруги постійного струму щодо вхідної напруги постійного струму. Змінний цикл роботи контролює вихідну напругу.	Завантажувальні перетворювачі (Boost Converters), Buck-Boost Converters, Chopper, Cuk Converters	Живлення електронного обладнання, робототехніка, автомобілі/транспорт, підсилювачі, СЕС
AC-DC-AC	AC / DC / AC перетворювачі, а саме перетворювачі з ланкою постійного струму, виконують перетворення вхідного змінного струму до параметрів вихідного змінного струму за допомогою ланки постійного струму між ступенями перетворення (випрямляч, ланка постійного струму та інвертор)	Перетворювач типу Back to Back, перетворювач типу випрямляч - інвертор	Для одинарного або комплексного використання різних ел. генераторів, джерела РГ, ЛЕС

* AC – параметри змінного струму (alternating current), DC – параметри постійного струму (direct current).

Маховики

Маховик – масивне колесо, яке обертаючись зберігає електроенергію у вигляді кінетичної енергії. Маховик приводиться в дію електродвигуном-генератором (ЕДГ), що виконує перетворення електричної енергії у кінетичну і навпаки Щоб мінімізувати втрачену під час обертання та тертя енергію, маховики часто поміщають всередину вакуумного контейнера.

Ротор є основним компонентом маховика. Роторні характеристики, такі як інерція та максимальна швидкість обертання, визначають енергетичну ємність і щільність приладів. ЕДГ і пов'язана з ним СЕ, визначають максимальну потужність маховика, що дозволяє відокремити енергетичні та електричні потужності. Енергоресурси маховиків незалежні, і це дає змогу оптимізувати різні параметри через застосування накопичувача енергії.

Накопичувачі на основі маховиків сприяють збільшенню частки вітрової та сонячної енергетики в енергетичних системах підвищуючи стійкість таких систем. Коливання потужності внаслідок сонячних та вітрових джерел компенсуються за рахунок зберігання енергії у сонячний або вітряний періоди, і вони постачаються назад при потребі. Накопичувачі на основі маховиків можуть застосовуватись для згладжування коливань викликаних змінами вітрових потоків. Інше їх застосування, – регулювання частоти мережі. У СЕС вони можуть бути інтегровані у системи накопичення на основі акумуляторних батарей для покращення вихідного сигналу та продовження строку служби акумуляторних батарей.

Основні характеристики маховиків: високий життєвий цикл, довгий паспортний термін служби (більше 20 років), швидка реакція на коливання потужності у системі, висока ефективність, можливість швидко заряджатися та віддавати енергію, висока щільність потоку енергії та мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Основними перевагами технології використання маховиків є: швидкий час реагування та значна інерційність для стабілізації мережі, тривалий термін експлуатації та дуже низькі вимоги до експлуатації та обслуговування. Головним бар'єром до широкого впровадження даної технології є високі інвестиційні витрати.

Електрохімічні акумуляторні батареї (Battery Energy Storage Systems (BESS)).

Даний тип накопичувачів відноситься до електрохімічних технологій зберігання енергії, які перетворюють електроенергію на хімічний потенціал для зберігання, а потім назад до електроенергії. Батареї можна розбити на три основні категорії:

- звичайні акумулятори, які складені з осередків, які містять два електроди (наприклад, свинцеву кислоту, іон літію);
- високотемпературні акумулятори, що зберігають електроенергію в розплавленій солі (наприклад, NAS);
- батареї, які використовують електролітні рідини в ємностях (наприклад, Zn / Br Redox, FE / Cr Redox).

Основні характеристики електрохімічних акумуляторних батарей: велика потужність, електроліт можна легко замінити, висока швидкодія при переході від режиму заряду до режиму розряду (приблизно 1 мс), низький коефіцієнт корисної дії (ККД). У накопичувальній системі немає самостійного розряду, оскільки електроліти не можуть реагувати, коли вони зберігаються окремо. Основні характеристики BESS систем наведено у табл. 3 [18–23].

Отже, електрохімічні акумуляторні батареї мають широкий спектр застосування та ряд переваг, серед яких: дуже швидкий час реагування та високу ефективність, але при цьому вони мають досить високі капітальні витрати.

Звичайно, перш ніж впроваджувати використання такого типу накопичувачів слід розробити інструменти аналізу для вивчення технічної та економічної доцільності інтеграції їх в електричні мережі.

Паливні комірки

Паливні комірки [21] відноситься до накопичувачів, принцип дії яких полягає у зберіганні/накопиченні хімічної енергії, а саме використання електричної енергії для створення палива, яке може спалюватися на звичайних електростанціях. Основним паливом є синтетичний метан (і в деякій мірі водень). Процедура складається з двох етапів:

1. Електроенергія використовується для електролізу, щоб розділити воду на водень та кисень.
2. Водень реагує з діоксидом вуглецю для створення метану.

Метан є основною складовою природного газу, тому його можна вводити в існуючу інфраструктуру газотранспортних та розподільчих систем (хабів та сховищ природного газу). Висока ємність газосховищ може потім використовуватися для зберігання в середньостроковій і довгостроковій перспективі.

Проаналізувавши вище викладене та [17–23], можна виокремити відповідні типи пристроїв накопичення електричної енергії:

- гідроакумуляційні електростанції (ГАЕС та МГАЕС);
- системи накопичення енергії зі стисненим повітрям (*Compressed-air energy storage / CAES*);
- маховики;
- електрохімічні акумуляторні батареї;
- паливні комірки.

Технології накопичення електроенергії також можна класифікувати за формою накопичення:

1. Накопичення електричної енергії з використанням конденсаторів та суперконденсаторів.
2. Механічне накопичення енергії: накопичення кінетичної енергії; зберігання потенційної енергії.

3. Накопичення хімічної енергії: зберігання електрохімічної енергії (звичайні батареї); зберігання хімічної енергії (паливні елементи, розплавлені карбонатні паливні елементи – MCFC та батареї Metal-Air); зберігання термохімічної енергії.

Таблиця 3 - Характеристика накопичувачів електроенергії

Характеристика	Тип накопичувача															
	PHE S	CA ES	Lead-acid	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-Ion	NaS	Zebra	VRB	Zn Br	Metal-air Battery	Маховики	SMES	Суперконденсатори	Паливні комірки	TES
Потужність (МВт)	100-5000	1-400	0,001-50	0-46	0,01 до ~ МВт	0,1-50	0,05-34	0,001-1	0,005-1,5	0,025-1	0,02-10	0,002-20	0,01-10	0,001-10	0,00001-50	0,1-300
Тривалість розряду	10-100	2-100	год.	сек. - год.	сек. - год.	0,1-5	5-8	хв. - 8 год.	сек. - 8 год.	сек. - 4 год.	3-4	сек. - 15 хв.	сек.	сек.	сек. - 24+	1-24 год.+
ККД	70-87 %	40-80 %	70-92 %	60-70 %	60-66 %	85-90 %	75-90 %	~90 %	65-85 %	75-80 %	40-60 %	80-99 %	85-99 %	97%+	20-70 %	30-60 %
Строк служби (років)	40-100	20-100	5-15 (~10)	5-20	3-15	5-20	15	8-14	10-20	5-20	-	15-20	20+	20+	5-15	10-40
Строк служби (циклів)	12000-30000+	30000+	500-12000	1000-2500	200-1500	1000-10000	2000-5000	2500-3000	13000+	~2000	1000-3000	1000000	100000+	100000+	100-10000	2000-14000

4. Зберігання теплової енергії: зберігання низькотемпературної енергії; високотемпературне зберігання енергії (теплові системи, такі як акумулятори пари або гарячої води, графіт, бетон, приховані системи тепла).

Таблиця 4 - Порівняння технічних характеристик накопичувачів електричної енергії (ESS)

Системи	Потужність та час розряду		Тривалість зберігання		Капітальна вартість	
	Номінальна потужність	Час розряду	Самостійна розрядка в день	Відповідна тривалість зберігання	\$/кВт	\$/кВтгод
ГАЕС	100–5000 МВт	1–24 г+	Дуже мала	Години – місяці	600–2000	5–100
CAES	5–300 МВт	1–24 г+	Мало	Години – місяці	400–800	2–50
Свинцево-кислотні акумулятори	0–20 МВт	Секунди-години	0.1–0.3 %	Хвилини – дні	300–600	200–400
NiCd	0–40 МВт	Секунди-години	0.2–0.6 %	Хвилини – дні	500–1500	800–1500
NaS	50 кВт–8 МВт	Секунди-години	~20 %	Секунди-години	1000–3000	300–500
Літій-іонні акумулятори	0–100 кВт	Хвилини-години	0.1–0.3 %	Хвилини – дні	1200	600–2500
Паливні елементи	0–50 МВт	Секунди – 24 год+	Майже нуль	Години – місяці	10,000+	
Аморфні метали	0–10 кВт	Секунди – 24 год+	Дуже мала	Години – місяці	100–250	10–60
SMES	100 кВт–10 МВт	Мілісекунди – 8с	10–15 %	Хвилини – години	200–300	1000–10,000
Маховики	0 – 250 кВт	Мілісекунди	100 %	Секунди – хвилини	250–350	1000–5000

Разом з системою накопичення електроенергії важливу роль в структурі ЛЕС відіграють пристрої силової електроніки (SE), які забезпечують перетворення енергії в ЛЕС та керування режимами. Стратегія керування полягає в тому, що ЛЕС зазвичай працює паралельно до загальної електричної мережі. У разі виникнення будь-яких аварійних ситуацій в мережі або її планового обслуговування ЛЕС може бути

відключена від мережі і продовжувати працювати в острівному режимі і навпаки. ЛЕС на рівні розподілу зазвичай характеризується необхідністю перетворення енергії від НВДЕ. Для забезпечення надійної та стабільної роботи ЛЕС використовуються різні типи перетворювачів на базі пристроїв СЕ та накопичувачів. Їх типи та характеристики наведені в табл. 2, 4. Зазвичай номінальна пікова потужність ЛЕС обмежується 10 МВА. Тому інтерфейс, який забезпечує взаємодію ЛЕС і загальної мережі, відіграє важливу роль, а спосіб перемикання та СК цього компонента визначає ефективність взаємодії з зовнішньою енергосистемою.

На ряду з системою перетворення розподільна мережа має важливу роль, як складова частина ЛЕС. Розподільні мережі можуть класифікуватись за трьома типами: лінії постійного струму; лінії змінного струму промислової частоти; височастотні лінії змінного струму (High Frequency AC – HFAC).

У випадку лінії змінного струму промислової частоти джерела РГ приєднуються до головної шини в ЛЕС. Постійний струм від джерел РГ перетворюється в змінний промислової частоти 50 Гц за допомогою відповідного інвертора і потім передається на навантаження.

Навантаження підключається до розподільної мережі, яка може гарантувати ефективну взаємодію ланки генерації і розподільної мережі. При більш високій частоті гармоніки більш високого порядку відфільтровуються, що обмежує проблеми якості енергії. Але недоліком є те, що HFAC підвищує реактивний опір лінії і збільшує втрати потужності.

Отже, проаналізувавши усе вищезазначене, в ЛЕС можна виділити наступні структурні складові:

- система генерації ЛЕС, що розрахована на повне покриття локального навантаження (табл. 5);
- ланка перетворення та накопичення електроенергії, що в окремому випадку може бути складовою системи генерації;
- ланки розподілу та система керування;
- локальне навантаження.

Таблиця 5 - Характеристика джерел живлення в ЛЕС

Тип джерела	Види джерел	Форми напруг та струмів джерела	Вихідна потужність	Перетворення	Режим роботи
Загальна електрична мережа		$\begin{cases} u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n U_k \\ i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{n,m} I_k \end{cases}$	$P = P_1 + P_\infty$ $\frac{dP}{dt} = \text{var} \Rightarrow$ керовано	Трансформатор, U_1 / U_2 AC-DC	1.Режим централізованої генерації повинен постійно покривати графік навантаження
Джерела РГ з перетворювачами	ВЕС, МГЕС, СЕС, паливна комірка	$\begin{cases} U_0, I_0, \text{дж. НВДЕ} \\ u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n U_k \\ i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{n,m} I_k \end{cases}, \text{ДГ...}$	$P = P_1 + P_\infty$ $\frac{dP}{dt} = \text{var} \Rightarrow$ не керовано	AC-DC-AC, DC-DC-AC,	1.Режим енергоострова з акумулюванням енергії 2. Паралельна робота з мережею та безперервна генерація
Джерела РГ на основі СМ / АМ	Когенераційні уст-ки, ДГ, МГЕС, ВЕС	$\begin{cases} u(t) = \sum_{k=1}^n U_k \\ i(t) = \sum_{k=1}^{n,m} I_k \end{cases}$	$P = P_1 + P_\infty$ $\frac{dP}{dt} = \text{var} \Rightarrow$ керовано	СМ, АМ, AC-DC	1.Режим енергоострова – резервне живлення у випадку відключення від загальної мережі 2.Паралельна робота для покриття пікових навантажень / видача ел. ен. в мережу
Джерела РГ постійного струму (в т.ч. акумулятори)	СЕС, ВЕС, паливні комірки; батареї, маховики та суперконденсатори	U_0, I_0	$\frac{dP}{dt} = \text{var} \Rightarrow$ керовано	DC-DC-AC, AC-DC-AC	1.Режим енергоострова з акумулюванням енергії 2.Паралельна робота з мережею та, безперервна генерація

Розглядаючи типи джерел у системі генерації ЛЕС, а також режими їхньої роботи (табл. 5), очевидним стає поява режимів паралельної роботи з мережею та генерації електричної енергії у мережу. Саме ця особливість притаманна саме ЛЕС з накопичувачами повинна враховуватися при подальшому аналізі енергетичних процесів у зазначених системах.

5. Оцінювання енергетичних процесів у Локальних електроенергетичних системах з різнотипними джерелами РГ та накопичувачами

При роботі ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами виникають певні проблеми. Серед них: проблема

оптимального використання електроенергії, проблема неурівноваженості напруги між генераторами та споживачами електроенергії, проблема оцінки якості електроенергії (електромагнітної сумісності) та проблема усунення негативних взаємних впливів [11]. Зважаючи на це, для вирішення оптимізаційної задачі підвищення якості та енергоефективності у структурі ЛЕС слід проводити аналіз складових додаткових втрат. Даний аналіз може ґрунтуватися на оцінюванні величини потужності Фризе Q_F , та обмінних процесів у ЛЕС на основі обмінної потужності Q_{OB} (Q_{EX}) [11]. Для аналізу обмінних процесів використовують модифікації обмінної потужності, за базове визначення якої, використовуємо співвідношення:

$$Q_{OB} = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} u(t) i_r(t) dt, \quad (1)$$

де t^+ – інтервал часу, що відповідає додатній величині відбору активної потужності від генерації на інтервалі T ; $u(t)$ – напруга у виділеному перетині ЛЕС; $i_r(t) = i(t) - i_a(t)$ – реактивна складова струму; $i_a(t) = u(t)P / U^2$ – активна складова струму; $i(t)$ – повний струм в гілці; P – активна потужність; U – діюче значення напруги.

Несинусоїдальність у перетині ЛЕС

За умови, що в перетині довільної електротехнічної системи всіма джерелами генерується несинусоїдальна напруга $e(t)$, то і струм в даному перетині буде несинусоїдальний $J(t)$ (рис. 1).

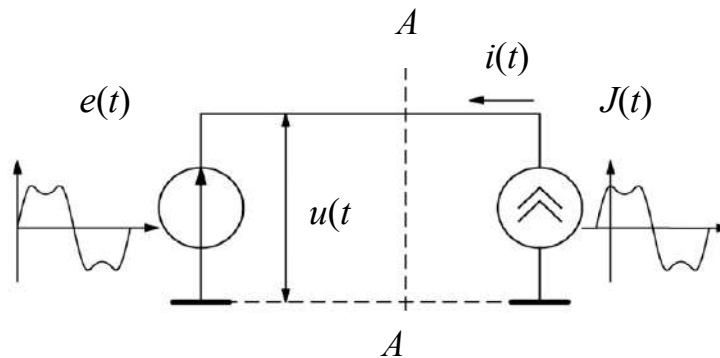


Рис. 1. Еквівалентна модель перетину ЛЕС

В залежності від конфігурації системи еквівалентний струм та напруга в результаті можуть мати як однаковий, так і різний гармонічний склад. Для прикладу розглянемо два варіанти наведені в табл. 6. Для оцінки енергетичних процесів у випадку однакового гармонічного складу можна використовувати реактивну потужність Будеана:

$$Q_B = \sum_{v=1}^N Q_v = \sum_{v=1}^N U_v I_v \sin(\varphi_v), \quad (2)$$

де v – порядок гармонічної складової.

Таблиця 6 - Варіанти гармонічного складу струму та напруги в перетині ЛЕС

Тип сигналу	Математичний опис сигналу	Вигляд залежності
Однаковий гармонічний склад	$u(t) = u_{(1)}(t) + u_{(3)}(t);$ $i(t) = i_{(1)}(t) + i_{(3)}(t).$	Рис. 2
Різний гармонічний склад	$u(t) = u_{(1)}(t) + u_{(3)}(t);$ $i(t) = i_{(1)}(t) + i_{(5)}(t).$	Рис. 3

Для однакового та різного гармонічного складу струму та напруги в перетині електротехнічної системи реактивна потужність Будеана відповідно матиме вигляд:

$$Q_B = Q_1 + Q_3 = U_1 I_1 \sin(\varphi_1) + U_3 I_3 \sin(\varphi_3), \quad (3)$$

$$Q_B = Q_1 + Q_3 + Q_5 = U_1 I_1 \sin(\varphi_1) + U_3 I_3 \sin(\varphi_3) + U_5 I_5 \sin(\varphi_5),$$

$$Q_B = U_1 I_1 \sin(\varphi_1) = Q_1, \quad (4)$$

$$\text{де } U_3 = k_{U3} U_1, I_3 = k_{I3} I_1.$$

Вираз обмінної потужності для v -ї гармонічної складової визначається зі співвідношення:

$$Q_{OB(v)} = \pm \frac{U_{m(v)} I_{m(v)}}{8\pi} (3 \sin(\varphi_v) - \sin(3\varphi_v)). \quad (5)$$

У виразі (5) знак «+» або «-» залежить від характеру навантаження: активно-ємнісний або активно-індуктивний відповідно.

На рис. 2, 3 представлено залежності реактивної потужності Будеана Q_B та обмінної потужності Q_{OB} , $Q_{OB(1)}$ для різних коефіцієнтів пульсації в залежності від кута зсуву фаз між струмом та напругою φ відповідно для однакового та різного гармонічного складу.

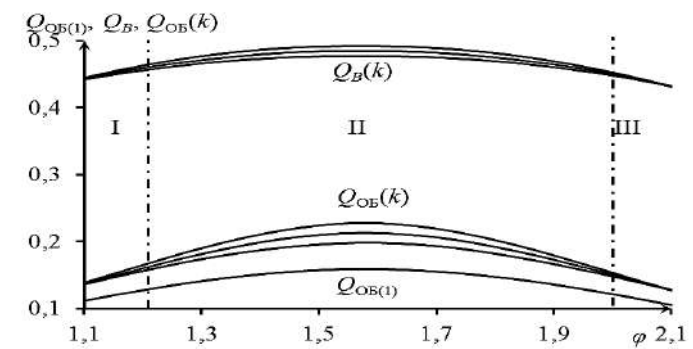


Рис. 2. Залежності $Q_{OB(1)}$, Q_B , $Q_{OB(k)}$ від кута зсуву основної гармонічної складової при однаковому гармонічному складі струму та напруги

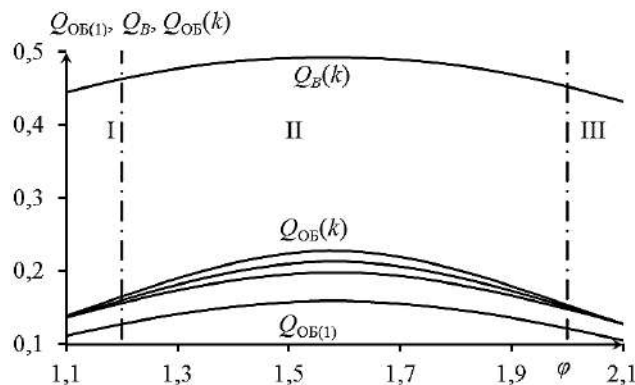


Рис. 3. Залежності $Q_{OB(1)}$, Q_B , $Q_{OB(k)}$ від кута зсуву основної гармонічної складової при різному гармонічному складі струму та напруги

На рис. 2 можна виділити три основні зони. В I та III зоні як реактивна потужність Будеана так і обмінна потужність не змінюється в залежності від коефіцієнту пульсації. В зоні II реактивна потужність Будеана відрізняється лише на 1,5–4% для коефіцієнтів пульсації відповідно 10, 20 та 30%, у той час як обмінна потужність відрізняється на 7–25%. На рис. 3 також явно можна виділити три основні зони. Проте на відміну від залежностей рис. 2 реактивної потужності Будеана Q_B не залежатиме від коефіцієнтів пульсації, оскільки буде рівною реактивній потужності за першою гармонікою, що впливає з наступного виразу (4).

Відхилення частоти при синусоїдальних та несинусоїдальних режимах роботи ЛЕС

Одним з показників якості електроенергії, що на пряму залежить від роботи джерел живлення та їх супутнього обладнання є відхилення частоти. Відповідно до діючих стандартів нормально допустимі та гранично допустимі межі відхилення частоти складають $\pm 0,2$ Гц та $\pm 0,4$ Гц [12]. Доцільно оцінити зв'язок

між відхиленням частоти та її впливом на обмінні процеси в системі. Н рис. 4 наведено еквівалентна модель лінійної електротехнічної системи з індуктивно-активним навантаженням.

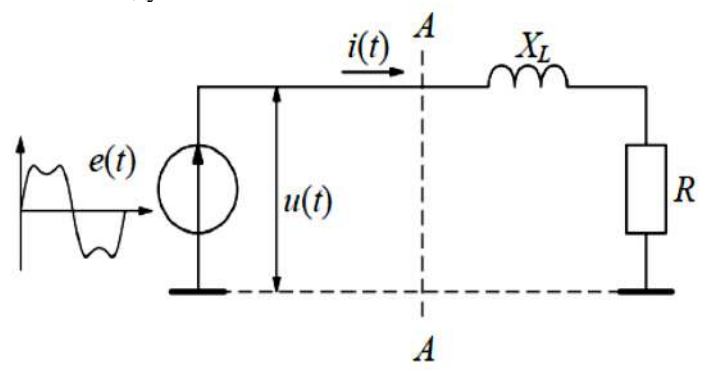


Рис. 4. Модель для оцінки впливу коливань частоти джерела живлення на обмінні процеси в ЛЕС

З врахуванням основних законів електротехніки для випадку електротехнічної системи з індуктивно-активним навантаженням формулу обмінної потужності (5) можна записати у вигляді:

$$Q_{об(v)} = \frac{U_{m(v)}^2 (\sin(3\varphi_{i(v)}) - \sin(\varphi_{i(v)}))}{8v\pi \sqrt{R^2 + (2v\pi(f + \Delta f)L)^2}} \quad (6)$$

Змінюючи коефіцієнт пульсації k_{U3} від 0 до 25 % побудуємо залежності $Q_{об}$ від частоти (рис. 5).

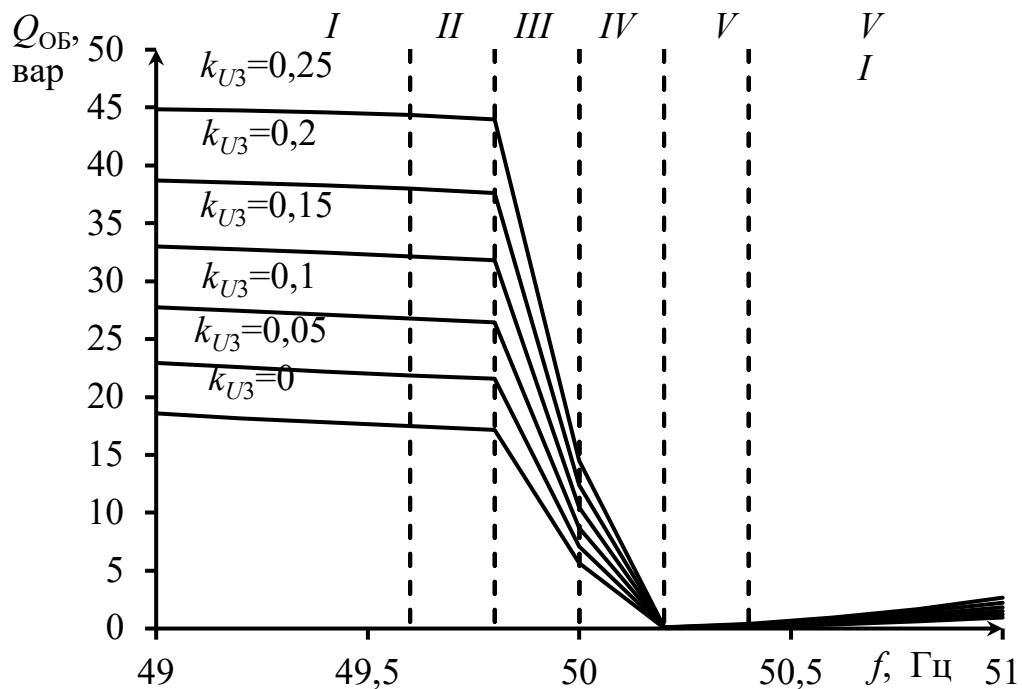


Рис. 5. Залежності обмінної потужності від коливань частоти при різних значеннях коефіцієнтів пульсації

На рис. 5 можна виділити зони, що не відповідають нормам: зона I та VI; зони де коливання частоти відповідають гранично допустимим значенням $\Delta f = \pm 0,4$ Гц – II та V; зони, що відповідають нормально допустимим значенням $\Delta f = \pm 0,2$ Гц – III та IV. Як видно з рис. 4 при значеннях коливання частоти менших 49,8 Гц обмінна потужність зростає, це приведе до зміни балансу активних потужностей у Microgrid, що забезпечується при частоті 50 Гц. Незначне зменшення частоти може викликати насичення і як наслідок зростання втрат у сталі і появу вищих гармонік у напрузі. Також зменшення частоти призводить до збільшення механічних втрат в двигунах. Зростання частоти призводить до падіння обмінної потужності в перетині, що пов'язано зі зменшенням періоду дії напруги та взаємною компенсацією основної та третьої гармонічної складових.

6. Способи комплексного оцінювання структури та енергетичних процесів у ЛЕС з РГ та накопичувачами

Наведений у попередньому розділі показник разом з показниками якості електричної енергії та надійності слід враховувати при проведенні комплексного аналізу ЛЕС з джерелами РГ та інтегрованими системами накопичення електроенергії. Для виконання даної задачі можуть бути запропоновані різні евристичні та алгоритмічні процедури згортки нескінченного ряду значень у просторовий графічний образ. Виділяють п'ять типів таких когнітивних образів: спіральну, лінійну динамічну, матричну, гармонічну та віялову динамічну ритмограми. Відоме одночасне відображення показників якості електроенергії (ПЯЕ) на одній круговій діаграмі, що дає змогу провести значення ПЯЕ згідно з ГОСТ 13109-97 та [12, 28] за критеріями «Задовільно» чи «Незадовільно».

Можна запропонувати спосіб відображення інформації з метою якісної оцінки значень ПЯЕ, яка є більш широкою, ніж «Задовільно» чи «Незадовільно» (рис. 6). На наведеній діаграмі Шумана встановлено, що:

- область (1) (на діаграмі – 0,3 відносних одиниць (в.о.)) – відповідає оцінці «Дуже добре»;
- область (2) (0,3 – 0,6 в.о.) – відповідає оцінці «Добре»;
- область (3) (0,6 – 1,0 в.о.) – відповідає оцінці «Нормально»;
- область (4) (1,0 – 1,2 в.о.) – відповідає оцінці «Погано».

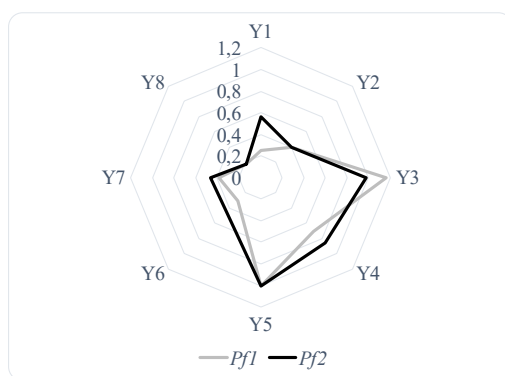


Рис. 6. Графічне відображення величин ПЯЕ в ЛЕС

За допомогою графічних моделей на одній діаграмі можна представити не тільки значення показників ПЯЕ, а й енергетичні характеристики або їхню комбінацію з ПЯЕ. Такі діаграми назвемо «енергетичним профілем» ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами електроенергії.

Розвитком запропонованої моделі візуалізації енергетичних характеристик, з одного боку, може бути відображення пристовів функцій енергетичних процесів у рамках однієї діаграми, а також більш поглиблений просторовий аналіз характеристик енергетичних процесів у часі та при зміні окремих режимних параметрів системи.

На рис. 6 зображено два енергетичні профілі ЛЕС (Pf_1 , Pf_2), котрі відображають два різних стани ЛЕС. Шкали показників градовані у відносних одиницях.

Pf_2 (табл. 7), котрий містить «покращені» показники, хоча і має в окремих випадках значення гірші, ніж Pf_1 , проте вся сукупність показників Pf_2 не виходить за межі області «Нормально», на відміну від Pf_1 . Це свідчить про більш якісний стан процесів в описаній ЛЕС.

Таблиця 7 - Розрахункові значення профілів ЛЕС

Нормалізоване значення	$SAIDI$	$SAIFI$	$MAIFI$	U	f	ENS	Q_{EX}	THD
Pf_1	0,25	0,4	1,16	0,7	1,001	0,3	0,38	0,18
Pf_2	0,56	0,4	0,98	0,85	1,0008	0,45	0,46	0,18

Розширена множина показників та запропонований спосіб візуалізації дають змогу враховувати структуру та усталені режими роботи ЛЕС при комплексній оцінці їх стабільності та надійності.

7. Обговорення результатів дослідження щодо оцінювання режимів функціонування локальних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами

Як видно з розділу 5 (рис. 2–4), обрані авторами показники для оцінювання енергетичних процесів (вирази (1) – (6)) у ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами є дійсно універсальними зважаючи на структуру зазначених систем. Універсальність даних показників підтверджується можливістю врахування

двосторонніх потоків потужності, котрі виникають при появі джерел РГ та накопичувачів.

Разом з тим особливістю запропонованого способу комплексного оцінювання ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами (розділ б) є те, що він дає змогу у рамках однієї діаграми відображати різні за своєю суттю показники.

Спосіб комплексного оцінювання ЛЕС з джерелами РГ полягає у складанні «енергетичного профілю» ЛЕС та його графічного відображення. Обмеженням отриманих результатів є те, що у рамках запропонованого способу комплексного оцінювання ЛЕС з джерелами РГ, є недостатнє розкриття усіх можливих комбінацій кількісних та якісних, а також технічних, економічних та інших типів показників у рамках даного дослідження. Разом з тим, саме вибір оптимальних показників та їх комбінацій, з урахуванням структури ЛЕС, може стати основою для подальших наукових досліджень.

Висновки

1. Проведено детальний аналіз структури локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами. Даний аналіз дає змогу чітко виокремити усі структурні складові зазначених систем. Це в свою чергу стало підґрунтям до вибору методів аналізу енергетичних процесів локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами

2. На основі проведеного аналізу було класифіковано накопичувачі електричної енергії, котрі можуть застосовуватися у локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації. Дана авторами класифікація спирається, як на різні типи накопичувачів так і на способи накопичення енергії і враховує особливості застосування у ЛЕС з джерелами РГ.

3. Спираючись на структурні особливості локальних енергетичних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами, запропоновано спосіб оцінювання енергетичних процесів. Даний спосіб базується на оцінках обмінних потужностей у перетинах зазначених систем з урахуванням особливостей їх структури.

4. Для підвищення ефективності функціонування ЛЕС з джерелами РГ та накопичувачами запропоновано спосіб комплексного оцінювання зазначених систем. Даний спосіб спирається на методи візуального відображення технічних та економічних показників і дає змогу у рамках однієї діаграми відображати різні за своєю суттю показники.

REFERENCES

1. E. Hossain, E. Kabalci, R. Bayindir, R. Perez, "Microgrid testbeds around the world: State of art", *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 132-153, October 2014.
2. *Microgrid Deployment Tracker 4Q12*", Pike Research Report, 2012. Sadrul Ula, T. S. Kalkur, Melissa S. Mattmuller, Robert J. Hofinger, Ashoka K. S. Bhat, Badrul H. Chowdhury, Jerry C. Whitaker, and Isidor Buchmann, "The Electronics Handbook", Second Edition. Apr 2005 , 1033 -1257 2005.
3. Lubna Mariam, Malabika Basu, and Michael F. Conlon, "A Review of Existing Microgrid Architectures," *Journal of Engineering*, pp.1-8, 2013. doi:10.1155/2013/937614.
4. Changhee Cho; Jin-Hong Jeon; Jong-Yul Kim; Soonman Kwon; Kyongyop Park; Sungshin Kim, "Active Synchronizing Control of a Microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.26, no.12, pp.3707,3719, Dec. 2011
5. N.W.A. Lidula, A.D. Rajapakse, "Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 186-202, January 2011.
6. Taha Selim Ustun, Cagil Ozansoy, Aladin Zayegh, "Recent developments in microgrids and example cases around the world—A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, Pages 4030-4041, October 2011.
7. Ritwik Majumder, "Some Aspects of Stability in Microgrids", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp.3243,3252, Aug. 2013
8. C. Ma, Y. Hous, "Classified Overview of Microgrids and Developments in China" *Energy Tech* 2012, Ohio, pp. 1-6, 29-31 May 2012.
9. Kyrylenko O.V. Main features of the stability and reliability enhancement of electricity grid with DG in Ukraine based on IEEE standards / Kyrylenko, O.V., Strzelecki, R., Denysiuk, S.P., Derevianko, D.G. // *Technical Electrodynamics*. – 2013. – № 6. – С. 46–50.
10. Resnick Institute Report "Grid 2020 Towards a Policy of Renewable and Distributed Energy Resources", September 2012.
11. Denysiuk S.P. Otsinka efektyvnosti sumisnoi roboty rozoseredzhenykh dzherel heneratsii elektroenerhii, vkluchaiuchy vidnovliuvalni, v elektroenerhetychnykh systemakh [Tekst] / S.P. Denysiuk, T.M. Baziuk, D.H. Derevianko // *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. – 2013. – № 3(80). – С. 54–59.
12. E. June, "Power Quality Standards for Electric," pp. 1–15, 2009.
13. Guerrero, J.M., "Connecting renewable energy sources into the smartgrid," 2011 IEEE International

Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp.2400-2566, 27-30 June 2011 ISIE 2011, Poland.

14. Suryanarayanan, S.; Mitra, J.; Biswas, S., "A conceptual framework of a hierarchically networked agent-based microgrid architecture," *2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp.1,5, 19-22 April 2010.

15. Sudipta Chakraborty, Bill Kramer, Benjamin Kroposki, "A review of power electronics interfaces for distributed energy systems towards achieving low-cost modular design", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 13, no. 9, Pages 2323-2335, December 2009.

16. Ming Ding; Yingyuan Zhang; Meiqin Mao, "Key technologies for microgrids-a review," *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009. SUPERGEN '09., pp.1,5, 6-7 April 2009, Nanjing China.

17. M. Nakhamkin, "Novel Compressed Air Energy Storage Concepts," in *Electricity Storage Association Meeting 2006: Energy Storage in Action* Knoxville, Tenn.: Energy Storage Association, 2006

18. W. Lachs, D. Sutanto, Uncertainty in electricity supply controlled by energy storage, *Proceedings of International Conference on Energy Management and Power Delivery*, EPDM'95, 1, November 21–23, 1995, pp. 302–307.

19. S.A. Lone, Mufti. M.D., Integrating redox flow battery system with a wind- diesel power system, in: *Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, PEDES'06, December 12–15, 2006, pp. 1–6.

20. J. Zeng, B. Zhang, C. Mao, Y. Wang, Use of battery energy storage system to improve the power quality and stability of wind farms, in: *International Conference on Power System Technology*, PowerCon 2006, October 1–6, 2006.

21. D. Sutanto, Energy storage system to improve power quality and system reliability, in: *Student Conference on Research and Development*, SCOREd 2002, 2002, pp. 8–11.

22. M.-T. Tsai, C.-E. Lin, W.-I. Tsai, C.-L. Huang, Design and implementation of a demand-side multifunction battery energy storage system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 42 (6) (1995) 642–652.

23. Cheung KYC, Cheung STH, Silva N, et al. Large-scale energy storage systems, *Imperial College London*, ISE22002/2003, Available online: [http://www.homes.doc.ic.ac.uk/~matti/ise2grp/energystorage_report/\[2007-03-20\]](http://www.homes.doc.ic.ac.uk/~matti/ise2grp/energystorage_report/[2007-03-20]).

24. ChaoyongHou; Xuehao Hu; Dong Hui, "Plug and play power electronics interface applied in microgrid," *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, pp.719,723, 6-9 July 2011.

25. Wei Huang, Miao Lu, Li Zhang, "Survey on Microgrid Control Strategies", *Energy Procedia*, vol. 12, Pages 206-212, 2011.

26. F Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas, "Microgrids management", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol: 6, no: 3, pp. 54-65, May-June 2008.

27. Xisheng Tang; Zhiping Qi, "Energy storage control in renewable energy based microgrid," *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp.1-6, 22-26 July 2012.

28. Denysiuk S. A novel method of complex reliability assessment in Microgrids with Distributed Generation / Denysiuk S., Derevianko D. // *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, MEES 2017– p. 212-215.

УДК 621.314

С. П. Денисюк, д-р техн. наук, проф., **ORCID 0000-0002-6299-3680**
Д.Г. Деревянко, канд. техн. наук, доц., **ORCID 0000-0002-4877-5601**
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Д. С. Горенко, преподаватель, **ORCID 0000-0002-7879-7801**
Васильковский профессиональный колледж
Национального авиационного университета

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСТОЧНИКАМИ РАСПЕРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ И НАКОПИТЕЛЯМИ

Рассмотрена структура локальных электроэнергетических систем с источниками рассредоточенной генерации. Представлены основные модели указанных систем. Представлена детальная классификация звена генерации локальных электроэнергетических систем с источниками рассредоточенной генерации которая содержит основные характеристики генераторов. Проанализированы разнотипные средства накопления электроэнергии и особенности их применения. Выделены основные типы накопителей, которые

содержат устройства накопления электрической энергии с использованием конденсаторов и суперконденсаторов, устройства механического накопления энергии, устройства накопления химической энергии, устройства хранения тепловой энергии. Тщательно проанализированы энергетические процессы в электроэнергетических системах с источниками рассредоточенной генерации и накопителями электрической энергии путем оценки величин и знаков обменных мощностей в сечениях этих систем. Среди вышеуказанных процессов: несинусоидальных режима в сечениях локальных электроэнергетических системах и отклонения частоты при синусоидальных и несинусоидальных режимах работы. Для оптимизации энергетических процессов в указанных системах предложен метод визуального отображения технических и экономических показателей, который позволяет комплексно оценить системы с источниками рассредоточенной генерации и разнотипными накопителями электрической энергии и процессы в них. Учитывая особенности структуры и процессов функционирования систем с источниками рассредоточенной генерации выбраны следующие критерии, как экономическая составляющая стоимости элементов системы, ее доступность в указанном регионе, экологичность и срок службы. Для сочетание технических и экономических критериев предложено использовать их графическое отображение.

Ключевые слова: рассредоточена генерация, локальные электроэнергетические системы, Microgrid, накопители электроэнергии, энергетические процессы.

S. Denysiuk, Dr. Sc. Sciences., Prof., **ORCID** 0000-0002-6299-3680

D. Derevyanko, PhD, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-4877-5601

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

D. Horenko, Teacher, **ORCID** 0000-0002-7879-7801

Vasylykiv Vocational College

National Aviation University

MODES EVALUATION FEATURES IN LOCAL POWER SYSTEMS WITH DISTRIBUTED GENERATION AND STORAGE

The structure of local electric power systems with sources of Dispersed Generation is considered. The main models of these systems are presented. A detailed classification of the generation unit of local power systems with sources of scattered generation is presented, which contains the main characteristics of generators. Different types of means of electricity storage and features of their application are analyzed. The main types of storage devices that contain devices for storing electricity using capacitors and supercapacitors, devices for mechanical energy storage, devices for storing chemical energy, storage devices for thermal energy are identified. Energy processes in electric power systems with distributed generation sources and electric energy storage devices are carefully analyzed by estimating the values and signs of exchange capacities in the intersections of these systems. Among the above processes: non-sinusoidal modes in the intersections of local power systems and frequency deviations in sinusoidal and non-sinusoidal modes of operation. To optimize energy processes in these systems, a method of visual display of technical and economic indicators is proposed, which allows a comprehensive assessment of systems with distributed generation sources and different types of electrical energy storage and processes in them. Taking into account the peculiarities of the structure and functioning of systems with sources of dispersed generation, such criteria as the economic component of the cost of system elements, its availability in the specified region, environmental friendliness and service life are selected. To combine technical and economic criteria, it is proposed to use their graphical representation.

Keywords: dispersed generation, local power systems, Microgrid, power storage, energy processes.

Надійшла 15.05.2020

Received 15.05.2020

В. А. Попов, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-3484-4597
Д. В. Яценко, PhD студент, ORCID 0000-0001-6702-569X
О. В. Аданіков, PhD студент, ORCID 0000-0003-2773-244X
О. В. Яценко, магістр, ORCID 0000-0001-6434-9365
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ З ДИСТАНЦІЙНИМ КЕРУВАННЯМ В ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ АКТИВНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

Широке впровадження джерел розосередженої генерації у мережах 6-10 кВ призводить до необхідності застосування нових технічних засобів та розробки відповідної методології керування режимами. Разом з тим, формування активних розподільних мереж, як етапу впровадження концепції Smart Grid, передбачає поряд з їх автоматизацію забезпечення адекватного інформаційного моніторингу процесів передачі та розподілу електричної енергії. Тільки за цих умов з'являється можливість вирішення багатьох задач керування режимами роботи розподільних мереж з необхідним рівнем ефективності. Виходячи з цього, в роботі задача вибору оптимальної конфігурації розподільної мережі розглядається, як задачі оперативного керування. Для прийняття економічно обґрунтованих рішень зі зміни топології розподільної мережі у статті розроблено нову модель прогнозування електричного навантаження та вихідної потужності джерел розосередженої генерації. Особливістю даної моделі є її адаптивність та можливість одночасного прогнозування значень відповідних параметрів режиму впродовж наперед заданих інтервалів часу.

Ключові слова: активна розподільна мережа, розосереджена генерація, електричні навантаження, прогнозування, керування режимами.

Вступ. Як об'єкт управління, системи електропостачання (СЕР) являють собою досить складні багаторівневі системи, стійке функціонування яких, витрати на експлуатацію та збитки у споживачів багато в чому визначаються рівнем автоматизації управління параметрами технологічного процесу. Серед процесів генерування передачі та розподілу електричної енергії (ЕЕ), найнижчою є ефективність операцій з її розподілу між окремими споживачами. Втрати ЕЕ на цьому етапі в даний час в кілька разів перевищують втрати на її передачу. За даними [1] втрати ЕЕ в мережах середньої та низької напруги у США, Англії, Німеччині, Японії та інших країн становлять в даний час від 8 до 12%, в той час як втрати ЕЕ в мережах високої напруги не перевищують 4%. В Україні становище ще гірше. Втрати потужності в мережах середньої і низької напруги досягають 15-20% [2].

Основним і найбільш ефективним заходом щодо зниження технічних втрат електроенергії у розподільних мережах є визначення їх оптимальної топології. Згідно традиційної постановки задачі, раціональні місця розмикання електричних мереж, побудованих за петлевою схемою, встановлювали двічі на рік, відповідно, для осінньо-зимового та весняно-літнього максимумів навантажень.

Завдання пошуку місць розмикання розподільної електричної мережі формується так: необхідно визначити місця розмикання мережі, що забезпечують мінімум втрат активної енергії при недопущенні перевантаження ділянок розподільних ліній напругою 6-10 кВ і силових трансформаторів в центрах живлення (ЦЖ), а також дотриманні допустимого рівня напруги в вузлах і рівня струмів замикання на землю на кожній секції шин ЦЖ.

Оскільки одна з основних особливостей активних розподільних мереж, які відрізняє їх від мереж традиційного виконання є рівень автоматизації, то при використанні сучасних комутаційних дистанційно керованих апаратів з'являється можливість управляти топологією мережі в реальному часі. Зазначена задача стає ще більш актуальною в умовах широкого впровадження в розподільні мережі розосереджених джерел генерації та акумулювання ЕЕ.

Виходячи з зазначеного, **метою роботи** є створення алгоритму визначення раціональних місць розміщення та використання вимикачів з дистанційним керуванням на підставі розробленої адекватної адаптивної моделі прогнозування електричного навантаження та параметрів розосереджених джерел енергії для можливості формування ефективних режимів роботи розподільних мереж.

Постановка задачі. Відомо, що створення активних розподільних мереж згідно впровадженню концепції Smart Grid передбачає не тільки широку їх автоматизацію, але і включає в себе повне інформаційне забезпечення процесів як передачі і розподілу ЕЕ, так і її генерації локальними джерелами.

© В. А. Попов, Д. В. Яценко, О. В. Аданіков, О. В. Яценко, 2020

При цьому вся ця інформація отримується в реальному часі. Ці обставини відкривають нові можливості для більш ефективного вирішення багатьох традиційних задач керування режимами розподільних мереж. Зокрема, задача вибору оптимальних місць розмикання розподільних мереж, яка традиційно розклалась як задача середньострокового планування, в зазначених умовах може розглядатися у якості задачі оперативного управління. Це означає, що місця нормального розмикання розподільних мереж не залишаються незмінними протягом сезону року і навіть доби, а можуть змінюватися в залежності від фактичного режиму розподільної лінії. Це виглядає особливо актуальним за умов неоднорідності електричних навантажень у добовому або сезонному розрізах. Ще більш привабливою ця задача стає за умови використання розосередженої генерації, особливо при орієнтації на відновлювані джерела енергії з нестабільної вихідною потужністю. Зрозуміло, що робота такого джерела умовно з максимальною потужністю або його відключення, скоріш за все буде формувати суттєво різні струморозподіли в електричній мережі і, відповідно, вимагати різних точок розмикання відповідної лінії для забезпечення мінімуму втрат ЕЕ.

В цьому випадку, так само, як і при традиційній постановці завдання, в якості критерію оптимальності розглядається мінімум втрат ЕЕ:

$$A \rightarrow \min. \quad (1)$$

При існуючому підході втрати ЕЕ обчислювалися, наприклад, для окремих доби, виходячи з типових для кожного з двох розглянутих характерних сезонів року графіків навантажень вузлів мережі. Виходячи з отриманих результатів і здійснювався вибір оптимального розмикання розподільної лінії. При цьому обрана точка розмикання залишалася фіксованою в межах всього умовного сезону року.

При існуючому підході втрати ЕЕ обчислювалися, наприклад, для окремих днів, виходячи з типових для кожного з двох розглянутих характерних сезонів року графіків навантажень вузлів мережі. На підставі отриманих результатів і здійснювався вибір оптимального місця розмикання розподільної лінії. При цьому обрана точка розмикання залишалася фіксованою в межах всього умовного сезону року.

Разом з тим, умову (1) можна трактувати і дещо в інший спосіб. Очевидно, що дана умова буде виконуватися, якщо ми забезпечимо мінімум втрат потужності на окремих часових інтервалах деякого розглянутого періоду часу (Т), наприклад, тієї ж доби, характерної з точки зору графіків навантаження для певного сезону року.

$$P \rightarrow \min, t = 1, \dots, T. \quad (2)$$

При цьому з'являється можливість одночасного зниження втрат ЕЕ. Зрозуміло, що такий підхід, в загальному випадку, передбачає можливість динамічної зміни точок розмикання розподільної лінії протягом аналізованого періоду часу (Т).

Природно, що практична реалізація даного підходу неможлива при орієнтації на вимикачі навантаження з ручним керуванням, які традиційно використовуються в розподільних мережах. Однак пропозиція часткової заміни традиційних комутаційних апаратів вписується в концепцію Smart Grid, що передбачає масштабну автоматизацію розподільних мереж, зокрема, можливість використання вимикачів з дистанційним управлінням.

Разом з тим, тут доречно зазначити наступне. Ні Україна, ні будь-яка інша навіть економічно розвинена країна світу, швидше за все, ні сьогодні, ні навіть в найближчій перспективі не буде мати можливості повного оснащення розподільних мереж комутаційними апаратами, які працюють автоматично (наприклад, типу реклоузера) або керованими дистанційно. Більш того, з огляду на фінансові можливості вітчизняної енергетичної галузі, важко припустити, що навіть в окремих розподільних лініях буде розміщуватися декілька дистанційно керованих вимикачів. Тому тут доречно говорити про точковому використанні даної пропозиції і за умови, що в конкретних розподільних лініях буде розміщено не більше двох комутаційних апаратів подібного типу. Безумовно, що в цьому випадку основна увага повинна бути приділена лініям, де є споживачі з незбіжним за часом характером зміни електроспоживання або в якості розосередженої генерації підключені поновлювані джерела енергії, режим генерації яких не співпадає з режимом споживання ЕЕ.

Відповідний алгоритм керування роботою вимикачів з дистанційним керуванням включає в себе:

- вибір ряду контурів розподільних мереж, в яких було б доцільним встановити дистанційно керовані комутаційні апарати, враховуючи добову неоднорідність потоків потужності на окремих ділянках;
- по окремих періодах часу, використовуючи характерні добові графіки навантажень вузлів і генерації з боку розосереджених джерел енергії, вирішується задача вибору оптимальних місць їх розміщення, виходячи з мінімізації втрат потужності;
- для контурів, у яких при різних добових режимах оптимальні місця їх розміщення не збігаються, визначаються вузли розміщені дистанційно керованих вимикачів;
- розраховується раціональна частота спрацьовування дистанційно керованих комутаційних апаратів, враховуючи їх комутаційний ресурс;

- визначається тривалість часу, у разі відповідної зміни параметрів на протязі якого, виникає доцільність зміни стану комутаційних апаратів, виходячи з доцільної частоти їх спрацювання;
- вирішується питання щодо зміни стану комутаційних апаратів на підставі аналізу спрогнозованих на визначений період часу параметрів режиму.

Таким чином, при розробці відповідної методології управління режимами розподільної мережі, виникає принципове завдання короткострокового прогнозування електричних навантажень. Його особливістю є те, що в даному випадку мова повинна йти не про прогнозування точкових значень електричного навантаження на деякому інтервалі попередження, а про необхідність здійснити як би «сканування» деякого інтервалу часу з тим, щоб переконатися в стабільності зміни відповідних параметрів режиму. Такий підхід дозволить, враховуючи існуючий обмежений комутаційний ресурс вимикачів, виключити необґрунтовані спрацьовування дистанційно керованих комутаційних апаратів при короткострокових змінах режиму електричної мережі.

Матеріал і результати досліджень

Існуючі методи прогнозування електричного навантаження можна розділити на такі категорії: статистичні, машинного навчання, ансамблеві та штучного інтелекту [3, 9]. В роботі, з метою підвищення адекватності прогнозування, запропоновано використання, так званої, адаптивної моделі, виходячи з того, що один з зазначених методів може давати кращі результати на якомусь певному проміжку часу, тоді як метод з іншого класу може дати кращий результат на наступному проміжку часу.

Робота адаптивної моделі передбачає одночасне виконання прогнозування декількома методами із обов'язковою перевіркою точності прогнозування на кожному кроці. У випадку, коли метод, який демонстрував найкращий результат на попередньому кроці, показує зміну параметрів режиму, які свідчать о необхідності перенесення місця розмикання РМ, тільки тоді ми виконуємо «сканування» попередньо визначеного часового проміжку з використанням даного методу, для перевірки стабільності зміни відповідних режимних параметрів. У випадку підтвердження стійкості зміни параметрів приймається рішення проводити перекомутацію електричної мережі, у іншому випадку конфігурація мережі залишається незмінною.

Нижче, з метою демонстрації переваг запропонованого підходу, розглянемо модель адаптивного прогнозування електричного навантаження, яка включає в себе наступні методи: випадкового лісу (Random forest), екстремального градієнтного бустингу (XGBoost), адаптивного бустингу (AdaBoost) та звичайного градієнтного бустингу (Gradient boosting). Дані методи відносяться до класу ансамблевих методів. Згідно [4-8] дані методи успішно використовуються дослідниками в останні роки для вирішення подібних задач.

Ансамблеві методи – це клас методів, у яких кілька моделей (так звані, «слабкі учні») навчаються для вирішення однієї і тієї ж проблеми і об'єднуються у ансамбль для отримання кращих результатів. Основна гіпотеза полягає в тому, що при правильному поєднанні слабких моделей ми можемо отримати більш точні і/або надійніші та адекватні моделі. В даних методах використовується теорія дерев рішень, детальніша інформація відносно дерева рішень та тлумачення відповідної термінології приведено у [10].

Дослідження проводилось з використанням даних відносно електричного навантаження визначених з дискретністю у 15 хвилин та отриманих в одній з розподільних мереж центрального регіону України. Об'єм даних на яких здійснювалося тренування та тестування адаптивної моделі відповідає 7 дням (п'ять робочих, два неробочих). При цьому для підвищення якості результатів прогнозу адаптивна модель окремо навчалася на даних робочих та неробочих днів. Графік електричного навантаження, який використовувався в дослідженнях, приведений на рисунку 1.

Методи даного класу є багатофакторні, де в якості факторів було використано місяць року, день тижня, година доби.

Екстремальний градієнтний бустинг. Згідно цього методу задаємося вихідними даними електричного навантаження: $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$, де x_i – часові фактори, від яких залежить значення навантаження, такі як година дня, номер дня тижня та ін.. y_i – фактичні значення електричного навантаження в i -й момент часу. XGBoost - це контрольований алгоритм навчання, який реалізує процес, так званий бустинг, щоб отримати найбільш точні моделі. Бустинг відноситься до методу навчання ансамблю для побудови послідовно багатьох моделей, причому кожна нова модель намагається виправити недоліки попередньої моделі. Кожна нова гілка, тобто, кожна нова модель, яка додається в ансамбль, є складовою дерева рішень. Таким чином, XGBoost забезпечує паралельне нарощування «дерева». Перевагами зазначеної структури («дерева») є: простота інтерпретації, відсутність обмежень на вид вихідної залежності, гнучкі вимоги до розміру вибірки [8].

Початковим етапом побудови моделі є її ініціалізація з постійним початковим значенням електричного навантаження:

а) Задаємося якимось усередненим початковим значенням $F_0(x)$ прогнозу електричного навантаження;

б) Використовуючи функцію втрат можна побудувати дерево рішень, мінімізуючи наступний вираз:

$$L = \arg \min \left[\sum_{i=1}^n L(y_i, p_i) \right] + \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot O_{value}^2 \quad (3)$$

де $L(y_i, p_i)$ – квадратична функція втрат, λ – параметр регуляризації, y_i – фактичне значення навантаження в i -й момент часу, p_i – прогнозне значення навантаження в i -й момент часу.

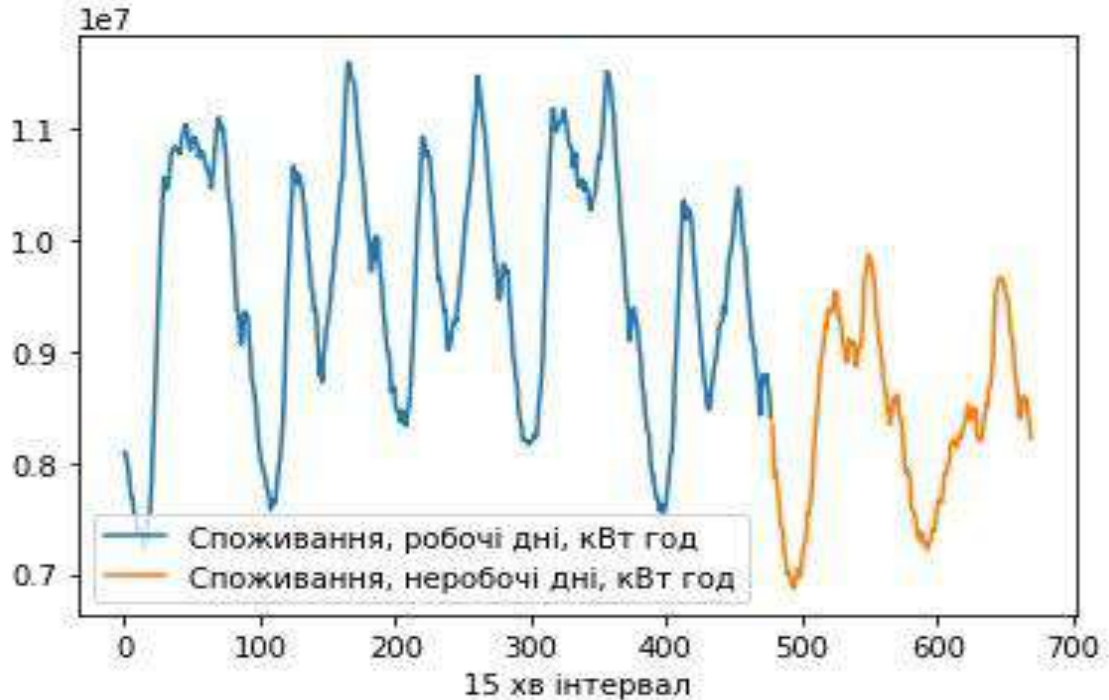


Рисунок 1- Графік електричного навантаження

Звідси знаходимо значення:

$$O_{value} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - p_i)}{n + \lambda} \quad (4)$$

Розраховується:

$$r_{im} = - \left[\frac{\partial L(y_i, F(x_i))}{\partial L(F(x_i))} \right]_{F(x)=F_{m-1}(x)}, \text{ для } i=1, \dots, n \quad (5)$$

Згідно виразу (5) ми знаходимо різницю між фактичним та прогнозним значенням навантаження для кожного спостереження вибірки.

Будується дерево рішень для значень r_{im} і створюється кінцева область R_{jm} з цих значень. Тобто, використовуючи значення розрахованих параметрів r_{im} ми розщеплюємо вибірку і знаходимо оптимальний критерій розщеплення за значенням S_{score} :

$$S_{score} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2}{n + \lambda} \quad (6)$$

Розрахуємо значення O_{value} для кожного листа дерева рішень згідно визначеного критерію розщеплення дерева рішень.

Оновлення результатів:

$$F_m(x) = F_0(x) + \varepsilon O_{value} \quad (7)$$

де ε – показник, який характеризує швидкість навчання і по замовчуванню приймається $\varepsilon=0,3$.

Згідно виразу (7) ми отримуємо нові прогнози значення електричного навантаження. Далі алгоритм повторюється.

Random forest. Обираємо діапазон даних з вибірки для побудови першого дерева рішень. Тобто для графіку навантаження ми обираємо довільний діапазон даних, для якого будемо перше дерево рішень. Потім розбиваємо нову вибірку на інтервали згідно певного фактору (наприклад часу).

Для розбиття дерева рішень на два листа в цьому випадку використовується середнє значення електричного навантаження на певному інтервалі часу $P_{average}$ та для кожного листа розраховується $Res_{squared}$, як сума квадратів значень різниці між фактичним значенням навантаження та $P_{average}$ для оцінки кожного розщеплення дерева рішень [4].

$$Res_{squared} = \sum_{i=1}^n (P_i - P_{average})^2 \quad (8)$$

$$\text{де } P_{average} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

Оновлення результатів прогнозу електричного навантаження проводиться після побудови множини дерев рішень. Розрахунок відбувається за принципом пошуку для кожного P_i інтервал, в який він потрапляє в кожному дереві. Результатом нового прогнозу буде середнє значення суми $P_{average}$:

$$F_m(x_i) = \frac{\sum_{i=1}^n P_{average}}{n} \quad (9)$$

Проводимо розрахунок точності прогнозних моделей. Використовуємо модель з найменшою похибкою на наступному кроці прогнозування, паралельно проводячи розрахунок за іншими моделями. Далі алгоритм повторюється.

Adaboost. Даний метод широко використовувався для вирішення задач класифікації та регресії [5]. Перший етап – прийняти рівномірний розподіл для параметру ω_i , таким чином, щоб кожне спостереження мало однакову вагу.

$$p^{(t)} = \frac{w^{(t)}}{\sum_{i=1}^N w_i^{(t)}} \quad (10)$$

Далі застосуємо, так званих, «слабких учнів» для виконання прогнозування електричного навантаження. У даному випадку будемо використовувати дерева рішень, які містять тільки один корінь та два листа [10].

Далі розрахуємо похибку для даного «слабкого учня» за виразом:

$$\varepsilon_t = \sum_{i=1}^N \left| \int_{y_i}^{h_i(x_i)} p_{i,y}^t dy \right| \quad (11)$$

де $t=1,2,\dots,T$, T -кількість ітерацій, яка задається на початку розрахунку.

Якщо $\varepsilon_t > 0,5$, то $T=t-1$, та цикл зупиняється.

Розрахуємо:

$$\beta_t = \frac{\varepsilon_t}{1 - \varepsilon_t} \quad (12)$$

На даному кроці розрахунку оновлюємо кінцеву вагу кожного «слабкого учня» за виразом:

$$w_{i,y}^{t+1} = w_{i,y}^t \text{ якщо } y_i \leq y \leq h(x_i) \text{ або } h(x_i) \leq y \leq y_i$$

$$w_{i,y}^{t+1} = w_{i,y}^t \beta_t \text{ у всіх інших випадках (14)}$$

Кінцева модель матиме вигляд:

$$h_f(x) = \inf \left\{ y \in Y : \sum_{t: h_t(x) \leq y} \log(1/\beta_t) \geq \frac{1}{2} \sum_t \log(1/\beta_t) \right\} \quad (15)$$

Gradient boosting. На першому кроці виконуємо ініціалізацію моделі з постійним значенням електричного навантаження. Для цього розрахуємо наступний вираз [6]:

$$F_0(x) = \arg \min_{F(x_i)} \sum_{i=1}^n L(y_i, F(x_i)) \quad (16)$$

Згідно цього виразу ми задаємося початковим прогнозним значенням навантаження на першій ітерації, де $L(y_i, F(x_i))$ – квадратична функція втрат; (y_i) - фактичне значення навантаження в i -й момент часу, $F(x_i)$ - прогнозне значення навантаження в i -й момент часу, x_i – часові фактори, від яких залежить значення навантаження).

На даному етапі задамося кількістю дерев рішень від $m=1$ до $M=100$:

а) задамося початковим прогнозним значенням навантаження на першій ітерації, та розраховуємо для $m=1$:

$$r_{im} = - \left[\frac{\partial L(y_i, F(x_i))}{\partial L(F(x_i))} \right]_{F(x)=F_{m-1}(x)}, \text{ для } i=1, \dots, n \quad (17)$$

Згідно виразу (17) ми знаходимо різницю між фактичним та прогнозним значенням навантаження для кожного спостереження вибірки.

б) Будуємо дерева рішень для значень r_{im} і створюємо кінцеву область R_{jm} з цих значень. Тобто, використовуючи розраховані за (17) потрібно:

- розділити вибірку за часовою ознакою і знайти оптимальний критерій розщеплення за індексом *Gini* (в загальному випадку $Gini = 1 - P_{yes}^2 - P_{no}^2$, де P_{yes} – вірогідність випадку, що значення відповідає листу з окремого дерева рішень, P_{no} - вірогідність випадку, що значення не відповідає листу з окремого дерева рішень) для побудови дерева рішень.

- для $j = 1, \dots, J_m$ де j – номер листа дерева рішень розрахувати:

$$\gamma_{jm} = \arg \min_{\gamma} \sum_{x_i \in R_{jm}} L(y_i, F_{m-1}(x_i) + \gamma) \quad (18)$$

Згідно цього виразу визначаються вихідні значення для кожного листа дерева.

- здійснити оновлення результатів:

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + v \sum_{j=1}^{J_m} \gamma_{jm} I(x \in R_{jm}), \quad (19)$$

де v – швидкість навчання, $F_{m-1}(x)$ – прогнозне значення електричного навантаження на попередній ітерації, $\sum_{j=1}^{J_m} \gamma_{jm} I(x \in R_{jm})$ – сума вихідних значень для кожного листа дерева.

Згідно (19) отримаємо нове прогнозне значення навантаження. Далі алгоритм повторюється.

В якості оцінки якості прогнозування використовуємо показник:

MAPE - середня абсолютна похибка прогнозу у відсотках:

$$MAPE = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (20)$$

де y_i - фактичне значення електричного навантаження;

\hat{y}_i - прогнозне значення електричного навантаження;

n - кількість значень у вибірці.

Експериментальні результати дослідження

При проведенні експериментальних розрахунків використовувалися місячні дані електричного навантаження визначені з дискретністю 15 хвилин. Адаптивна модель спочатку навчали на місячній вибірці, де три тижні розглядалися, як тренувальна послідовність та один тиждень у якості тестової. У ході розрахунків було визначено, що при використанні даних методів прогнозування мінімальний необхідний об'єм даних для навчання моделі дорівнює одному тижню. Це обумовлено тим, що при такому об'ємі даних модель може дати прогноз на визначений проміжок часу будь-якого дня наступного тижня з достатньою точністю.

Оскільки основне завдання, яке вирішується, це розробка адаптивної моделі прогнозування електричного навантаження для виконання керуючих впливів у розподільній мережі, то після визначення необхідного об'єму даних модель випробовували для прогнозування електричного навантаження для різних часових проміжків доби у продовж тижня. Результати експериментальних розрахунків з оцінкою похибки

прогнозу при використанні різних методів приведені нижче.

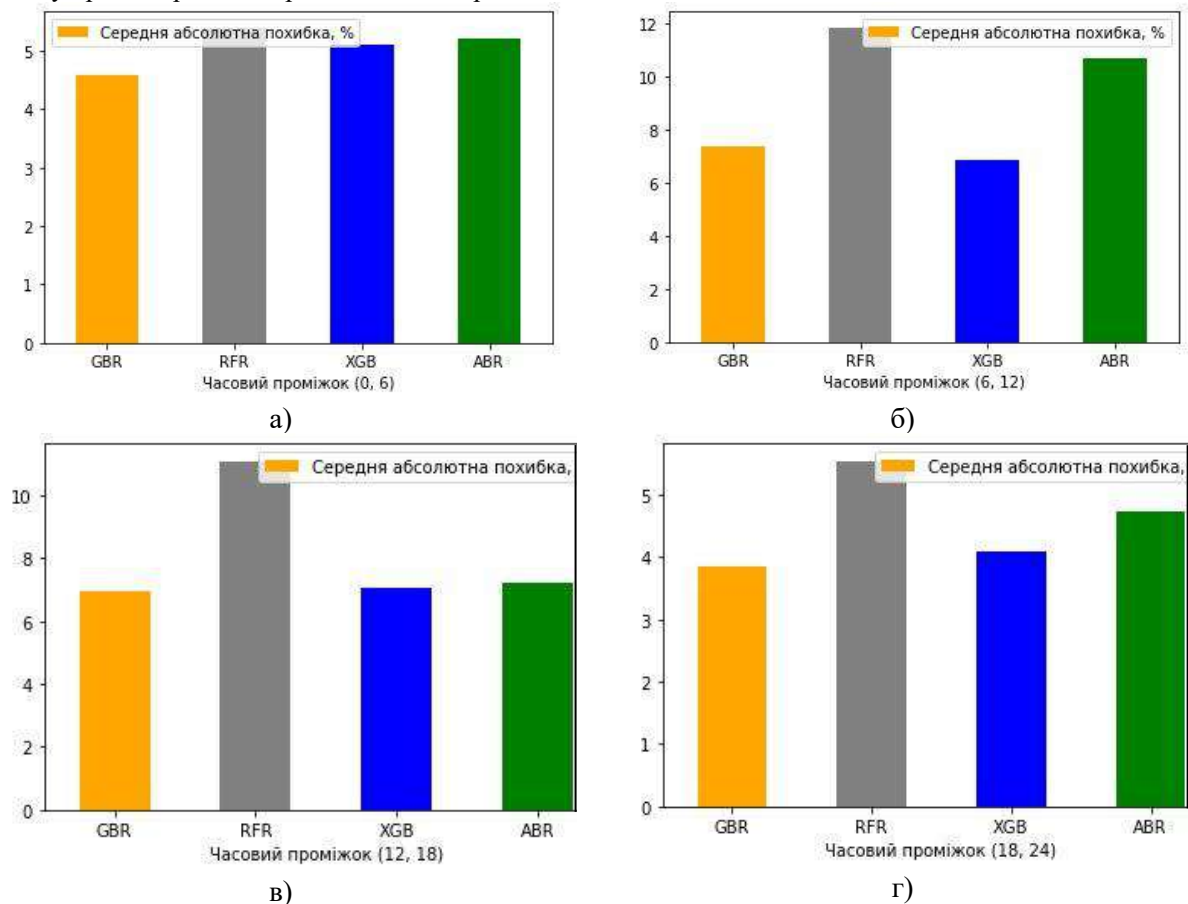


Рисунок 2 – Точність кожного методу адаптивної моделі на різних часових проміжках (а) – часовий проміжок 00:00 – 06:00; (б) – часовий проміжок 06:00 – 12:00; (в) – часовий проміжок 12:00 – 18:00; (г) – часовий проміжок 18:00 – 23:00.

Висновки

Отримані результати свідчать про доцільність використання різних методів прогнозування залежно від режимів мережі, наявності та якості вимірювань, а також типу споживачів. Результати експериментальних розрахунків демонструють, що один і той же метод може досягти найкращих показників протягом певного періоду часу доби або дня тижня, у той же час він погано працює на інших часових інтервалах або в інші дні тижня. Це дозволяє зробити висновок, що єдиний метод прогнозу не може забезпечити оптимальну точність для будь-якого режиму мережі, будь-якого набору споживачів (типу та кількості) або для будь-якого дня року.

Як вирішення цього питання, у роботі пропонується новий адаптивний метод прогнозування електричного навантаження, який автоматично вибирає метод прогнозування, який краще відповідає певному часовому проміжку, дню тижня, режиму мережі та іншим факторам, що забезпечує прогноз із найменшою похибкою. Методологія адаптивного прогнозування навантаження перевірялась в існуючій розподільній мережі, і отримані результати показали ефективність запропонованого методу.

Список використаної літератури

1. SMART GRID или умные сети электроснабжения. URL: http://www.eneca.by/ru_smartgrid0/.
2. Стан справ з технологічними витратами електроенергії в електричних мережах України. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=93911.
3. Gross G. Short-term load forecasting. Proceedings of the IEEE, 1987, 75 (12),-pp. 1558 – 1571.
4. Y. Grichi, Y. Beauregard and T. M. Dao, A random forest method for obsolescence forecasting, IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2017, pp. 1602-1606.
5. Freund, Y., and Schapire, R.E., A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting, Journal of Computer and System Sciences, 1997, Vol. 55, No1, P. 119-139.
6. A. B. Nassif, Short term power demand prediction using stochastic gradient boosting, 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), 2016, p. 1-4.
7. J. Walther, D.Spanier, N.Panten, E.Abele. Very short-term load forecasting on factory level – A machine

learning approach, Procedia CIRP, 2019, Vol. 80, p. 705-710.

8. X. Liao, N. Cao, M. Li and X. Kang, Research on Short-Term Load Forecasting Using XGBoost Based on Similar Days, International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), Changsha, 2019, p. 675-678.

9. Ahmad, Tanveer&Zhang, Hongcai&Yan, Biao. A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grid and buildings. Sustainable Cities and Society, 2020, Vol. 55, p. 1-31.

10. Quinlan, J. R. Induction of decision trees. Machine Learning, 1986, Vol. 1(1), p. 81-106.

V. Popov, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0003-3484-4597

D. Yatsenko, PhD student, ORCID 0000-0001-6702-569X

A. Adanikov, PhD student, ORCID 0000-0003-2773-244X

O. Yatsenko, Master's student, ORCID 0000-0001-6434-9365

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

FEATURES OF USING REMOTE CONTROL SWITCHING DEVICES IN THE PROCESS OF FORMING ACTIVE DISTRIBUTION NETWORKS

Widespread introduction of sources of distributed generation in 6-10 kV networks leads to the need to use new technical means and develop an appropriate methodology for controlling regimes. At the same time, the formation of active distribution networks, as a stage of implementation of the Smart Grid concept, envisages, along with their automation, the provision of adequate information monitoring of electricity transmission and distribution processes. Only under these conditions there is a possibility of the decision of many problems of management of operating modes of distribution networks with necessary level of efficiency. Based on this, in this paper the problem of choosing the optimal configuration of the distribution network is considered as a task of operational management. To make economically justified decisions to change the topology of the distribution network, the article developed a new model for predicting the electrical load and output power of distributed generation sources. The peculiarity of this model is its adaptability and the ability to simultaneously predict the values of the relevant parameters of the mode during predetermined time intervals.

Keywords: active distribution network, dispersed generation, electrical loads, forecasting, mode control.

REFERENCES

1. SMART GRID or smart power supply networks Available: http://www.eneca.by/ru_smartgrid0/ Accessed on 29.10.2020.

2. State of affairs with technological costs of electricity in electric networks of Ukraine Available: http://www.eneca.by/ru_smartgrid0/ Accessed on 29.10.2020.

3. Gross, G., & Galiana, F. D. "SHORT-TERM LOAD FORECASTING". Proceedings of the IEEE, 1987, 75(12), pp. 1558-1573.

4. Y. Grichi, Y. Beauregard and T. M. Dao, "A random forest method for obsolescence forecasting," 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 2017, pp. 1602-1606.

5. Freund, Y., and Schapire, R.E. (1996b). "A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting", Journal of Computer and System Sciences, August 1997, pp. 119-139.

6. A. B. Nassif, "Short term power demand prediction using stochastic gradient boosting," 2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), 2016, pp. 1-4.

7. J. Walther, D. Spanier, N. Panten, E. Abele, "Very short-term load forecasting on factory level – A machine learning approach", Procedia CIRP, 2019, pp. 705-710.

8. X. Liao, N. Cao, M. Li and X. Kang, "Research on Short-Term Load Forecasting Using XGBoost Based on Similar Days," 2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), Changsha, China, 2019, pp. 675-678.

9. Ahmad, Tanveer&Zhang, Hongcai&Yan, Biao, "A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grid and buildings", Sustainable Cities and Society, 2020, pp. 1-31.

10. Quinlan, J. R., "Induction of decision trees", Machine Learning, 1986, pp. 81-106.

Надійшла 17.05.2020

Received 17.05.2020

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311

Д. В. Філянін, канд. техн. наук., асист., ORCID 0000-0003-3576-3633
А. В. Волошко, д-р техн. наук, проф.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Наявність нелінійних навантажень і зростання числа систем розподіленої генерації електроенергії призводять до спотворення форми кривих напруги і струму в системах електропостачання, тобто до появи гармонік струму і напруги. При цьому енергосистема зобов'язана поставляти електроенергію тільки основної частоти 50Гц з постійною амплітудою. Енергопостачальні організації зазвичай знімають з себе відповідальність за причини виникнення гармонік, вводячи стандарти або рекомендації щодо обмеження рівнів гармонійних складових в точках загального приєднання споживачів. Ці документи не враховують склад обладнання систем електропостачання і, відповідно, збитки, яких можуть завдати гармоніки мережевому обладнанню та устаткуванню споживача. Актуальність роботи обумовлена необхідністю достовірного визначення джерел гармонічних спотворень в системі електропостачання для ефективного функціонування системи штрафів і санкцій і більш ефективного визначення списку технічних заходів щодо підвищення якості електроенергії. У статті проведено огляд існуючих методів визначення джерел спотворення в системах електропостачання. Розглянуто їх основні принципи та особливості застосування.

Ключові слова: *якість електроенергії, гармоніки, джерела гармонічних спотворень, методи визначення джерел гармонічних спотворень.*

Вступ. Усі електроприймачі призначені для роботи при номінальних параметрах електричної енергії: частоті, напрузі і струмі. Тому для їх роботи має бути забезпечено необхідну якість електроенергії (ЯЕ).

Серед параметрів, що визначають ЯЕ, одне з найважливіших місць займають вищі гармоніки. Споживачі з нелінійним навантаженням перетворюють частину електроенергії синусоїдального струму в енергію несинусоїдального струму і повертають її в мережу. Ця енергія поширюється по мережах і потрапляє до інших споживачів, що призводить до економічних збитків, які в свою чергу поділяються на дві складові: електромагнітну і технологічну. За експертними оцінками значення технологічного збитку перевищує значення електромагнітного на порядок [1].

Збитки, які несуть суб'єкти процесу розподілу електричної енергії від погіршення її якості, повинні оплачуватися винуватцями. Для цього необхідно визначити джерела гармонік, оцінити ступінь участі кожного елемента електричної мережі і споживача в порушенні синусоїдальності.

Мета та завдання дослідження. Метою даної роботи є дослідження методів визначення джерел гармонічних спотворень в електричній мережі.

Для реалізації поставленої мети необхідно:

- провести літературний огляд основних існуючих методів визначення джерел гармонічних спотворень;
- проаналізувати особливості використання цих методів;
- по результатам оглядового дослідження зробити висновки.

Матеріал і результати досліджень. На сьогодні немає загальноприйнятого методу для виявлення винуватців порушення синусоїдальності напруги [2]. Єдиним діючим нормативним документом, який регламентує процедуру оцінки вкладу споживачів гармонічне спотворення електроенергії, є методичні вказівки [3], що затверджені Держенергонаглядом Міненерго РФ.

У джерелах [4–8] можна виділити дві групи підходів до визначення джерел гармонічних спотворень в точці загального підключення (ТЗП) [9]:

- 1) група, що базується на вимірах в ТЗП з відомим або невідомим опором мережі і споживача;

© Д. В. Філянін, А. В. Волошко, 2020

2) група, що базується на вимірах, взятих в різних точках системи електропостачання, з використанням методик оцінки стану системи [10].

Друга група підходів щодо визначення джерела гармонік використовується для системоутворюючих мереж і передбачає складні алгоритми оптимізації розташування датчиків по всій системі енергопостачання для оцінки джерел спотворень (наприклад [11]).

Розглянемо найбільш поширені методи визначення джерел гармонічних спотворень.

1. Метод включення/відключення споживача.

Метод розрахунку фактичного внеску споживача в спотворення параметрів якості електроенергії (ПЯЕ) по їх зміні при його вмиканні і вимиканні описано в [12–14]. Фактичний внесок споживача (ФВС) в спотворення ПЯЕ визначається, як різниця між значеннями ПЯЕ при увімкненому і при відключеному споживачеві

$$\text{ФВС} = (\Pi_{\text{в}}^{\text{а}} - \Pi_{\text{в}}^{\text{б}})^{1/\alpha},$$

де $\Pi_{\text{в}}$ – значення ПЯЕ в точці контролю при увімкненому і працюючому в нормальному режимі споживачеві; $\Pi_{\text{в}}^{\text{б}}$ – значення ПЯЕ в точці контролю при відключеному споживачеві; α – показник ступеня, який визначається типом спотворюючого обладнання [12].

Виміри $\Pi_{\text{в}}$ рекомендовано проводити протягом тижня. Тому цей метод рекомендовано застосовувати під час приймальних випробувань, а також в умовах експлуатації для споживачів, тривале відключення яких не є проблемою. Також цей метод не враховує векторний характер параметрів схеми заміщення розподільчої мережі і, як наслідок, некоректне визначення джерел спотворень напруги [15].

2. Метод побудови залежності ПЯЕ від потужності навантаження.

Метод заснований на визначенні статистичної залежності ПЯЕ від потужності $S_{\text{нав}}$ ввімкненого обладнання споживача. Для цього за результатами тривалих вимірювань знаходиться статистична, ймовірно лінійна, залежність між зміною ПЯЕ та навантаженням споживача: $\text{ПЯЕ} = f(S_{\text{нав}})$ [16].

Отримана залежність дозволяє оцінити фактичний внесок енергосистеми, як деяку постійну величину (так званий фон системи), при потужності навантаження, що дорівнює нулю. Ця постійна величина прирівнюється вкладу системи $\text{ПЯЕ}_{\text{с}} = f(0)$ в спотворення ПЯЕ. Фактичний внесок споживача в порушення ПЯЕ визначається виразом

$$\text{ПЯЕ}_{\text{сп}} = \text{ПЯЕ}_{\text{пот}} - \text{ПЯЕ}_{\text{с}},$$

де $\text{ПЯЕ}_{\text{пот}}$ – поточне значення ПЯЕ в ТЗП.

Враховуючи, що якість електроенергії в ТЗП визначається взаємним впливом всіх приєднань, то адекватність $\text{ПЯЕ} = f(S_{\text{нав}})$, як характеристики впливу одного конкретного приєднання на ПЯЕ, буде залежати від рівня внесених завад кожного приєднання. Саме тому застосування даного методу обмежується випадками, коли інші джерела спотворень і резонансні явища в електричній мережі не роблять значного впливу на аналізований процес, а спостережуваний споживач надає домінуючий вплив на якість електроенергії в ТЗП [17].

3. Метод визначення величини і знаку потужності спотворення.

Метод оцінки впливу нелінійного навантаження на спотворення ПЯЕ за величиною і напрямком активної потужності гармонік було запропоновано в [18, 19] і отримав свій подальший розвиток в [20–23]. Вважається, що цей метод є найбільш поширеним для визначення винуватця спотворення ПЯЕ. Суть його полягає у визначенні величини і знаку спотворюючої потужності в ТЗП

$$P_h = \frac{U_{hc} I_{hc} + U_{hs} I_{hs}}{2}; \quad Q_h = \frac{U_{hc} I_{hs} - U_{hs} I_{hc}}{2},$$

де P_h, Q_h – активна та реактивна потужності h -ї гармоніки; U_{hs}, U_{hc} – синусна та косинусна складові амплітуди напруги h -ї гармоніки; I_{hs}, I_{hc} – синусна та косинусна складові амплітуди струму h -ї гармоніки.

Винуватець спотворення визначається за знаком активної потужності гармоніки P_h щодо направлення потужності першої гармоніки в ТЗП:

- $P_h > 0$, джерело спотворення знаходиться в енергосистемі;
- $P_h < 0$, джерело спотворення знаходиться у споживача.

Далі, розраховуються різноманітні індекси, що дозволяють визначити фактичний внесок джерела спотворення в порушення синусоїдальності.

Метод рекомендовано до розрахунків стандартом IEEE 1459-2010 [2].

Недоліком цього методу є відсутність обліку взаємних потоків спотворюючої потужності, що можуть виникати при наявності декількох джерел спотворення в електричній мережі [24].

4. Розрахунково-аналітичний метод.

За цим методом для визначення фактичного внеску споживача складається баланс спотворюючих потужностей для ділянки системи, яку представляють у вигляді схеми заміщення, і наводиться розрахунок системи вищих гармонік в електричній мережі [25, 26]. Метод дозволяє оцінити можливий діапазон впливу споживача, за умови, що відомі фактичні значення та фази джерел спотворення або закони їх розподілу.

В [27] представлено метод, який також відноситься до розрахунково-аналітичних. У зв'язку з різними механізмами підсумовування спотворень від різних електроприймачів, нелінійне навантаження подається у вигляді набору груп однотипних елементів. Розрахункові вирази фактичного вкладу кожного l -го споживача в спотворення кривої напруги в точці загального підключення мають вигляд:

$$K_{U(v)_{\text{факт}}}^{(l)} = \frac{100}{\sqrt{3}S_{\text{кз}}} \cdot \beta \sqrt{\sum_{j=1}^{k_l} \left(\sum_{i=1}^{M_l} S_{(\text{ннл}i)l}^{\alpha} N_{(\text{ннл}i)l} \right)^{\beta/\alpha}} v_j^{\beta(1-p)};$$

$$K_{\text{нс}U_{\text{факт}}}^{(l)} = \frac{100}{\sqrt{3}S_{\text{кз}}} \sqrt{\sum_{j=1}^{k_l} \left(\sum_{i=1}^{M_l} S_{(\text{ннл}i)l}^{\alpha} N_{(\text{ннл}i)l} \right)^{2/\alpha} \left(\sum_{v=2}^n v^{2(1-p)} \right)},$$

де $S_{(\text{ннл}i)l}$ та $N_{(\text{ннл}i)l}$ – встановлена потужність і число спотворюючого обладнання в i -й групі однотипних елементів; M_l – кількість розглянутих груп однотипних елементів; α – показник ступеня, що враховує механізм підсумовування будь-якого виду спотворення, створюваного i -ми групами однотипних елементів; k_l – число розглянутих груп різнотипних елементів [28–32]; β – показник ступеня, що характеризує механізм підсумовування будь-якого виду спотворення, створюваного різними типами обладнання [29–33]; v – порядок гармоніки; n – кількість врахованих гармонік; p – для різних типів обладнання визначають за таблицею [27]; $S_{\text{кз}}$ – потужність трифазного короткого замикання мережі в точці, де проводиться розрахунок або вимір рівнів вищих гармонік і несинусоїдальності напруги.

Розрахунково-аналітичні методи можуть бути застосовані в проектних завданнях для вирішення питань про припустимість підключення нелінійних навантажень до діючих мереж або для прогнозування можливого впливу споживача на якість електроенергії в точці його приєднання [27, 34].

5. Гібридні методи.

Сутність цих методів полягає у визначенні параметрів еквівалентного лінійного навантаження за вимірюваннями в точці загального підключення:

5.1. Метод деформуючого та недеформуючого навантаження [35].

Відповідно до цього методу вимірний струм $i(t)$ є сума недеформуючого $i_n(t)$ і деформуючого $i_d(t)$ струмів:

$$i_n(t) = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{U_1} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \theta_k + k(\phi_1 - \theta_1));$$

$$i_d(t) = i(t) - i_n(t),$$

де U_1, I_1 – діючі значення напруги і струму першої гармоніки; θ_1, ϕ_1 – фази струму та напруги першої гармоніки; θ_k – фаза k -ї гармоніки напруги.

Вплив навантаження на спотворення напруги визначає коефіцієнт не колінеарності (%)

$$NC = \frac{I_d}{I} 100,$$

де I_d – середньоквадратичне значення спотворюючого струму $i_d(t)$; I – середньоквадратичне значення вимірюваного струму $i(t)$.

5.2. Метод спотворюючого і неспотворюючого струму [36].

Навантаження представляється у вигляді еквівалентного лінійного опору першій гармоніці

$$|Z_1| = \frac{U_1}{I_1},$$

де U_1, I_1 – діючі значення напруги та струму першої гармоніки, що виміряні в ТЗП.

Тоді

$$R = |Z_1| \cos \varphi_1; \quad X_1 = |Z_1| \sin \varphi_1; \quad L = \frac{X_1}{2\pi f_1},$$

де R – активна складова опору навантаження; X_1 – реактивний складова опору навантаження першій гармоніці; φ_1 – різниця фаз між векторами напруги і струму першої гармоніки; f_1 – частота мережі (50Гц); L – розрахункова індуктивність навантаження.

Розрахунковий опір навантаження гармонікам

$$X_k = 2\pi k f_1 L,$$

де k – порядок гармоніки.

Припускаючи, що R не залежить від частоти і без урахування поверхневого ефекту

$$|Z_k| = \sqrt{R^2 + X_k^2}; \quad \varphi_k = \text{tg}^{-1} \frac{X_k}{R}.$$

Струм, споживаний ідеальним лінійним навантаженням

$$i_L(t) = \sum_{k=1}^n \frac{U_k}{|Z_k|} \sqrt{2} \sin(2\pi k f_1 t + (\theta_k - \varphi_k)),$$

де θ_k – фаза вектору напруги k -ї гармоніки; φ_k – різниця фаз між векторами напруги та струму k -ї гармоніки. Різниця між вимірним струмом та розрахунковим ідеальним струмом називається нелінійним струмом

$$i_{nL}(t) = i(t) - i_L(t),$$

де $i(t)$ – вимірний струм.

Вплив навантаження на спотворення кривої напруги визначається коефіцієнтом нелінійності (%)

$$NL = \frac{I_{nL}}{I} 100,$$

де I_{nL} – середньоквадратичне значення нелінійного струму $i_{nL}(t)$; I – середньоквадратичне значення виміряного струму $i(t)$.

В основу цих методів покладено припущення про лінійність опору навантаження всім гармонічним складовим.

6. Метод еквівалентних джерел струму.

Метод еквівалентних джерел струму було представлено в [37]. Подальший розвиток метод отримав в [38–45]. Відповідно до цього методу електрична система і споживач щодо ТЗП подаються еквівалентними джерелами струмів спотворення і опорами (рис. 1).

Фактичний внесок споживача $\underline{U}_{\text{ФВСП}}$ і системи $\underline{U}_{\text{ФВС}}$ по напрузі для схеми заміщення визначаються за виразами:

$$\underline{U}_{\text{ФВСП}} = \frac{Z_C Z_{\text{СП}}}{Z_C + Z_{\text{СП}}} I_{\text{СП}}$$

$$\underline{U}_{\text{ФВС}} = \frac{Z_C Z_{\text{СП}}}{Z_C + Z_{\text{СП}}} I_C$$

У ТЗП можна виміряти тільки I_T і U_T . Невідомими залишаються значення I_C , Z_C , $I_{\text{СП}}$, $Z_{\text{СП}}$.

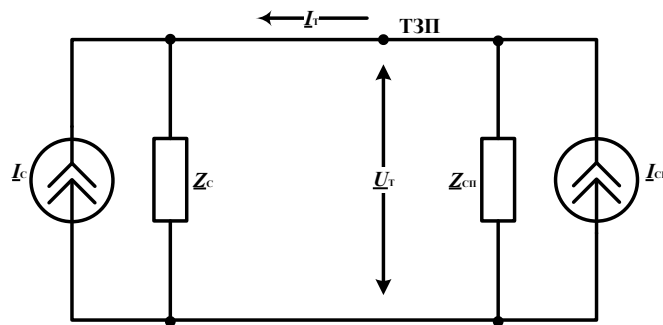


Рисунок 1. Схема заміщення системи електропостачання

Для визначення фактичного внеску застосовуються тривалі дискретні, з кроком Δt , виміри струму та напруги відносно розглянутого споживача. На кожному кроці вимірювання напруга гармонічної складової в ТЗП

$$U_T = Z_C (I_C + I_T) = Z_{\text{СП}} (I_{\text{СП}} - I_T).$$

При цьому допускається, що на етапі вимірювання величини Z_C , $Z_{\text{СП}}$ і фазовий кут основної гармоніки є незмінними. Тоді фактичний внесок в спотворення можна визначити по відношенню приросту ΔU_T і ΔI_T в ТЗП, допускаючи, що цей приріст викликаний змінами режиму або з боку енергосистеми, або з боку споживача.

При зміні струму з боку енергосистеми на величину ΔI_C відбудеться зміна струму і напруги в ТЗП на величини ΔI_T і ΔU_T , відповідно. Тоді опір лінійної частини навантаження має вигляд

$$Z_{\text{СП}} = -\frac{\Delta U_T}{\Delta I_T}.$$

Аналогічно, при зміні струму з боку споживача на величину $\Delta I_{\text{СП}}$ відбудеться зміна струму і напруги в ТЗП на величини ΔI_T і ΔU_T , відповідно. Тоді опір енергосистеми складе

$$Z_C = \frac{\Delta U_T}{\Delta I_T}.$$

Таким чином, збільшення напруги ΔU_T та струму ΔI_T на k -му інтервалі часу дозволяють визначити комплексну величину Z_k

$$Z_k = \frac{\Delta U_{Tk}}{\Delta I_{Tk}},$$

де ΔI_{Tk} – приріст струму в ТЗП на k -му інтервалі вимірювання; ΔU_{Tk} – збільшення напруги в ТЗП на k -му інтервалі вимірювання.

Дійсна частина будь-якого опору – величина позитивна. За знаком дійсної частини $\text{Re}(Z_k)$ визначається, яке з двох значень Z_C або $Z_{СП}$ знайдено на k -му кроці вимірювання

$$Z_k = \begin{cases} Z_C & \text{якщо } \text{Re}(Z_k) < 0; \\ Z_{СП} & \text{якщо } \text{Re}(Z_k) \geq 0. \end{cases}$$

Далі визначаються фактичні внески споживача і енергосистеми в спотворення напруги:

$$U_{\text{ФВСП}} = \frac{Z_C Z_{СП}}{Z_C + Z_{СП}} I_{СП} = (U_T + Z_{СП} I_T) \frac{Z_C}{Z_C + Z_{СП}};$$

$$U_{\text{ФВС}} = \frac{Z_C Z_{СП}}{Z_C + Z_{СП}} I_C = (U_T - Z_C I_T) \frac{Z_{СП}}{Z_C + Z_{СП}}.$$

Цей метод потребує мінімальну кількість вихідних даних і дозволяє визначити фактичний внесок в спотворення кривої напруги на тривалих інтервалах часу. До недоліків слід віднести неможливість визначення фактичного вкладу, коли до ТЗП підключене тільки одне джерело спотворення, та високу похибку визначення $Z_{СП}$ і Z_C при одночасній зміні струмів $I_{СП}$ і I_C .

Методи визначення джерела гармонічних спотворень, що представлено в [46–53], не знайшли широкого застосування.

Висновки:

- наявність гармонічних спотворень в системі електропостачання є актуальною проблемою, яка потребує вирішення;
- присутність вищих гармонік в електричній мережі істотно впливає на якість електропостачання;
- одним з напрямків щодо вирішення завдання підвищення якості електропостачання є визначення винуватців гармонічних спотворень;
- існують розробки низки методів визначення джерел гармонічних спотворень;
- існуючі методи визначення джерел гармонічних спотворень не дозволяють достовірно визначити всі джерела гармонік і ступінь їх участі в порушенні синусоїдальності напруги та струму.

Список використаної літератури

1. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г., Николаенко В. Г. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения. К.: Препринт 253 ИЭД АН УССР, 1981. 48 с.
2. IEEE Std 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. March 2010. IEEE Standard 1459. 40 p.
3. РД 153-34.0-15.501-01. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. [Введ. 2003-05-01]. М.: Энергосервис, 2003. 63 с.
4. Ferrero A., Menchetti A., Sasdelli R. Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems. European Transactions on Electric Power. 1996. V. 6. № 6. P. 401–406.
5. Czarnecki L. S., Świetlicki T. Power in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement. IEEE Trans. Instrum. Measur. 1990. V. 39. № 2. P. 340–345.
6. Emanuel A. E. On the Assessment of Harmonic Pollution. IEEE Transaction on Power Delivery. 1995. V. 10. № 3. P. 1693–1698.
7. Rens P. J., Swart P. H. On Techniques for the Localization of Multiple Distortion Sources in Three-Phase Networks: Time Domain Verification. ETEP. 2001. V. 11. № 5. P. 317–322.
8. Swart P. H., Case M. J., Van Wyk J. D. On Techniques for Localization of Sources Producing Distortion in Electric Power Networks. ETEP. 1994. V. 4. № 6. P. 485–490.
9. Herrera R. S., Pérez A., Salmerón P., Vázquez J. R., Litrán S. P. Distortion Sources Identification in Electric Power Systems. Department of Electrical Engineering E.P.S., Huelva University. URL: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf (дата звернення: 20.01.2016).
10. Heydt G. T. Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique. IEEE Trans. On Power Delivery. 1989. V. 4. № 1. P. 569–576.
11. Beites L. F., Alvarez M., Díaz A. Sensor optimum location algorithm for estimating harmonic sources injection in electrical networks. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). Cordoba, Spain, April 8–10, 2014. URL: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf> (дата звернення: 26.10.2020).
12. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.

13. Железко Ю. С. Присоединение потребителей к электрическим сетям общего назначения и договорные условия в части качества электроэнергии. Технологии электромагнитной совместимости. 2003. №1. С. 22–30.
14. Thunberg E., Söder L. A Norton Approach to Distribution Network Modeling for Harmonic Studies. IEEE Trans. On Power Delivery. 1999. V. 14. №1. P. 272–277.
15. Федосов Д. С. Разработка метода оценки влияния потребителей на несинусоидальность и несимметрию напряжений в электрической сети: дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2014. 195 с.
16. Тульский В. Н. Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 134 с.
17. Саенко Ю. Л., Калужный Д. Н. Анализ методов определения фактических вкладов в понижение качества электрической энергии по несимметрии и несинусоидальности напряжения. Електрифікація транспорту. 2015. №9. С. 123–133
18. Cristaldi L., Ferrero A. Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1995. V. 14. №3. P. 683–685.
19. Зыкин Ф. А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии. Электричество. 1992. №11. С. 13–19.
20. Chang G. W., Chen C. I., Teng Y. F. An application of radial basis function neural network for harmonics detection. 2008 Harmonics and Quality of Power 13th International Conference. Wollongong, Australia. 2008. P. 124–129
21. Xu W., Liu Y. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling. IEEE Trans. on Power Delivery. 2000. V. 15. №2. P. 804–811.
22. Xu W., Liu X., Liu Y. An investigation on the validity of power direction method for harmonic source determination. IEEE Trans. Power Delivery. 2003. V. 18. №1. P. 214–219.
23. Tanak T., Akagi H. A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits. IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. V. 10. №4. P. 1737–1742.
24. Сендерович Г. А. Определение долевого участия субъектов в ответственности за нарушение симметрии напряжений. Наукові праці Донецького національного технічного університету. 2011. №11(186). С. 330–335.
25. Смирнов С. С., Коверникова Л. И. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети. Электричество. 1996. №1. С. 58–64.
26. Смирнов С. С. Вероятностный расчет уровней напряжений высших гармоник в сети 110–220 кВ, питающей крупные нелинейные нагрузки. Электричество. 2000. №10. С. 25–30.
27. Майер В. Я., Зения, Ткач А. Н. Методика определения расчетного вклада потребителя в значение показателей качества электроэнергии в точке общего присоединения к энергосистеме. Электричество. 1993. №10. С. 14–18.
28. Ribeiro P. F. et all. Equipment Producing Harmonics and the Conditions Governing their Connection to the Main Power Supply. CIGRE – Electra. 1989. №123. P. 20–37.
29. Жежеленко И. Б., Рабинович М. Л., Божко В. М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. К: Техніка, 1981. 160 с.
30. Липский А. М. Качество электроснабжения промышленных предприятий. К: Вища шк., 1985. 160 с.
31. Иванов В. С. Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
32. Железко Ю. С., Кордюков Е. И., Курбацкий В. Г. и др. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии. Промышленная энергетика. 1990. №11. С. 52–55.
33. Abramovich B. J. Harmonics filters for the Sellinger converter station. GEC J. Sci. Tech. 1982. V. 48. P. 35–38.
34. Башкиров О. В., Першенков П. П., Тюрин Е. А. Определение вклада потребителя в изменение показателей качества электроэнергии. Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2009. Т. 2. №1. С. 77–79.
35. Srinivasan K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions. IEEE Trans. on Power Delivery. 1996. V. 11. №2. P. 1003–1012.
36. Dell'Aquila A., Marinelli M., Monopoli V. G., Zanchetta P. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions. IEEE Trans. on Power Delivery. 2004. V. 19. №3. P. 1284–1290.
37. Yang H. Assessment for Harmonics Emission Level from one particular customer. University of Liege, 1992. 8 p.
38. Майер В. Я., Зения. Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии. Электричество. 1994. №9. С. 19–24.

39. Смирнов С. С., Коверникова Л. И. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети. *Электричество*. 1996. №1. С. 56–64.
40. Курбацкий В. Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость технических средств в электрических сетях. Брянск: БрГТУ, 1999. 220 с.
41. Карташев И. И., Пономаренко И. С., Сыромятников С. Ю. Определение виновника ухудшения качества электроэнергии при расчетах за электроэнергию. *АСЭМ*. 2000. №19. С. 10–12.
42. Карташев И. И., Пономаренко И. С. Определение виновника искажений напряжения путем приборного контроля качества электроэнергии. Efficiency and power quality of electrical supply of industrial enterprises: Тез. докл. Международной научной конференции. Донецк, 2000. С. 337–340.
43. Гамазин С. И., Пётрович В. А. К вопросу об определении фактического вклада потребителя в искажение параметров качества электрической энергии. *Электрика*. 2002. №7. С. 47–50.
44. Xu W., Liu Y. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2000. V. 15. №2. P. 804–811.
45. Farhoodnea M., Mohamed Azah, Shareef H., Jabbar Khan R. A. An Improved Method for Determining Contribution of Utility and Customer Harmonic Distortions In A Power Distribution System. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 2010. V. 2. №3. P. 204–215.
46. Chaoying C., Xiuling L., Koval D., Xu W., Tayjasant T. Critical Impedance Method – a New Detecting Harmonic Sources Method in Distribution Systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2004. V. 19. №1. P. 288–297.
47. Li C., Xu W., Tayjasant T. A “critical impedance” – based method for identifying harmonic sources. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2004. V. 19. №2. P. 671–678.
48. Fernandez F. M., Chandramohan Nair P. S. Method for separation of customer and utility contributions of harmonics at point of common coupling. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2013. V. 7. №4. P. 374–381.
49. Васильев И. Е., Ключев Р. В., Васильев Е. И. Определение фактического вклада потребителя и системы в несинусоидальность напряжения предприятий цветной металлургии на основе активного эксперимента – включения трансформаторов на параллельную работу. Аудит и финансовый анализ. *Вычислительная техника и информатика*. 2011. №4. С. 0–4.
50. Abdullah A. R., Peng G. Z., Ghani S. A., Jopri M. H. A New Vector Draft Method for Harmonic Source Detection at Point of Common Coupling. *IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014)*. Langkawi, The Jewel of Kedah, Malaysia. 2014. P. 110–114.
51. Адалеев А. С., Коровкин Н. В. Метод локализации источника помехи в электрической схеме. *Известия РАН. Энергетика*. 2009. №4. С. 98–107.
52. Коровкин Н. В., Приходченко Р. В., Тухас В. А. Проблемы поиска источника помех в электросетях общего назначения. *Технологии электромагнитной совместимости*. 2011. №1(36). С. 50–58.
53. Коровкин Н. В., Лысенко Г. С. Технология локализации источников помех в энергосистемах. *Известия РАН. Энергетика*. 2013. №2. С. 121–130.

УДК 621.311

Д. В. Филянин, канд. техн. наук., асс., ORCID 0000-0003-3576-3633
А. В. Волошко, д-р техн. наук, проф.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Наличие нелинейных нагрузок и рост числа систем распределенной генерации электроэнергии приводят к искажению формы кривых напряжения и тока в системах электроснабжения, то есть к появлению гармоник тока и напряжения. При этом энергосистема обязана поставлять электроэнергию только основной частоты 50 Гц с постоянной амплитудой. Энергоснабжающие организации обычно снимают с себя ответственность за причины возникновения гармоник, вводя стандарты или рекомендации по ограничению уровней гармонических составляющих в точках общего присоединения потребителей. Эти документы не учитывают состав оборудования системы электроснабжения и, соответственно, убытки, которые могут нанести гармоники сетевому оборудованию и оборудованию потребителя. Актуальность работы обусловлена необходимостью достоверного определения источников гармонических искажений в системах электроснабжения для эффективного функционирования системы штрафов и санкций и более эффективного определения списка технических мероприятий по повышению качества электроэнергии. В статье проведен обзор существующих методов определения источников

гармонических искажений в системах электроснабжения. Рассмотрены их основные принципы и особенности применения.

Ключевые слова: *качество электроэнергии, гармоники, источники гармонических искажений, методы определения источников гармонических искажений.*

D. Filyanin, PhD, assistant, ORCID 0000-0003-3576-3633

A. Voloshko, Dr. Sci., Professor

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ANALYSIS OF HARMONIC DISTORTION SOURCES IDENTIFICATION METHODS IN DISTRIBUTION SYSTEMS

The presence of non-linear loads and the increase in the number of systems of distributed generation of electricity lead to a distortion of the voltage and current waveform in distribution systems (DS), that is, to the appearance of harmonics of current and voltage. In this case, the power system is obliged to supply electricity only to the fundamental frequency of 50 Hz with constant amplitude. Power supply organizations usually disclaim responsibility for the causes of harmonics by introducing standards or recommendations for limiting the levels of harmonic components in the points of common connection of consumers. These documents do not take into account the composition of DS equipment and, accordingly, the damage from these harmonics for network equipment and consumer equipment. The urgency of the work is due to the need to reliably identify the sources of harmonic distortion in the supply system for the effective functioning of the system of penalties and fines and to more effectively determine the list of measures to improve the electric power quality. The paper reviews the existing methods for distortion sources identification in supply systems. Their basic principles and application features are considered.

Keywords: *power quality, harmonics, harmonics sources, harmonic distortion sources identification methods.*

REFERENCES

1. Shidlovsky A. K., Kuznetsov V. G., Nikolaenko V. G. Economic evaluation of the effects of reducing the power quality in modern power systems. K.: Preprint 253 IED AS Ukrainian SSR, 1981. 48 p.
2. IEEE Std 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. March 2010. IEEE Standard 1459. 40 p.
3. RD 153-34.0-15.501-01. Methodological guidelines for monitoring and analysis of quality of electric energy in general purpose power supply systems. Part 2. Analysis of the power quality. [Approved 2003-05-01]. M.: Energoservice, 2003. 63 p.
4. Ferrero A., Menchetti A., Sasdelli R. Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems. European Transactions on Electric Power. 1996. V. 6. № 6. P. 401–406.
5. Czarnecki L. S., Świetlicki T. Power in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement. IEEE Trans. Instrum. Measur. 1990. V. 39. № 2. P. 340–345.
6. Emanuel A. E. On the Assessment of Harmonic Pollution. IEEE Transaction on Power Delivery. 1995. V. 10. № 3. P. 1693–1698.
7. Rens P. J., Swart P. H. On Techniques for the Localization of Multiple Distortion Sources in Three-Phase Networks: Time Domain Verification. ETEP. 2001. V. 11. № 5. P. 317–322.
8. Swart P. H., Case M. J., Van Wyk J. D. On Techniques for Localization of Sources Producing Distortion in Electric Power Networks. ETEP. 1994. V. 4. № 6. P. 485–490.
9. Herrera R. S., Pérez A., Salmerón P., Vázquez J. R., Litrán S. P. Distortion Sources Identification in Electric Power Systems. Department of Electrical Engineering E.P.S., Huelva University. URL: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf (дата звернення: 20.01.2016).
10. Heydt G. T. Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique. IEEE Trans. On Power Delivery. 1989. V. 4. № 1. P. 569–576.
11. Beites L. F., Alvarez M., Díaz A. Sensor optimum location algorithm for estimating harmonic sources injection in electrical networks. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'14). Cordoba, Spain, April 8–10, 2014. URL: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf> (дата звернення: 26.10.2020).
12. Zhelezko Yu. S. Power losses. Reactive power. Power Quality: A Guide to Practical Calculations. M.: ENAS, 2009. 456 p.
13. Zhelezko Yu. S. Connection of consumers to general-purpose power grids and contractual conditions in terms of power quality. Electromagnetic Compatibility Technologies. 2003. №1. P. 22–30.

14. Thunberg E., Söder L. A Norton Approach to Distribution Network Modeling for Harmonic Studies. IEEE Trans. On Power Delivery. 1999. V. 14. №1. P. 272–277.
15. Fedosov D. S. Development of a method for assessing the impact of consumers on nonsinusoidality and asymmetry of voltages in the electrical network: diss. ... PhD. Irkutsk, 2014. 195 p.
16. Tulsy V. N. Development of the methodology for detection the actual contribution in assessing the quality of electrical energy at the point of common connection: dis PhD. M., 2004. 134 p.
17. Saenko Yu. L., Kalyuzhny D. N. Analysis of methods for detection the actual contributions to the decrease of power quality by unbalance and non-sinusoidal voltage. Electrification of transport. 2015. №9. P. 123–133
18. Cristaldi L., Ferrero A. Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1995. V. 14. №3. P. 683–685.
19. Zykin F. A. Detection of the degree of participation of loads in reducing of power quality. Electricity. 1992. №11. P. 13–19.
20. Chang G. W., Chen C. I., Teng Y. F. An application of radial basis function neural network for harmonics detection. 2008 Harmonics and Quality of Power 13th International Conference. Wollongong, Australia. 2008. P. 124–129
21. Xu W., Liu Y. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling. IEEE Trans. on Power Delivery. 2000. V. 15. №2. P. 804–811.
22. Xu W., Liu X., Liu Y. An investigation on the validity of power direction method for harmonic source determination. IEEE Trans. Power Delivery. 2003. V. 18. №1. P. 214–219.
23. Tanak T., Akagi H. A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits. IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. V. 10. №4. P. 1737–1742.
24. Senderovich G. A. Determination of the share participation of subjects in responsibility for violation of voltage balance. Scientific works of Donetsk National Technical University. 2011. №11(186). P. 330–335.
25. Smirnov S. S., Kovernikova L. I. Consumer's contribution to the voltage levels of higher harmonics in the nodes of the distribution systems. Electricity. 1996. №1. P. 58–64.
26. Smirnov S. S. Probabilistic calculation of voltage levels of higher harmonics in a 110–220 kV network feeding large nonlinear loads. Electricity. 2000. №10. P. 25–30.
27. Mayer V. Ya., Zenia, Tkach A. N. Methods for determining the estimated consumer contribution to the value of power quality indicators at the point of common connection to the power system. Electricity. 1993. №10. P. 14–18.
28. Ribeiro P. F. et all. Equipment Producing Harmonics and the Conditions Governing their Connection to the Main Power Supply. CIGRE – Electra. 1989. №123. P. 20–37.
29. Zhezhenko I.B., Rabinovich M.L., Bozhko V.M. Power quality at industrial enterprises. K: Technics, 1981. 160 p.
30. Lipsky A. M. The quality of power supply of industrial enterprises. K: K: High school., 1985. 160 p.
31. Ivanov B. C. Sokolov V. I. Modes of consumption and power quality of power supply systems of industrial enterprises. M.: Energoatomizdat, 1987. 336 p.
32. Zhelezko Yu. S., Kordyukov E. I., Kurbatskii V. G., ets. Application rules discounts and surcharges to tariffs for power quality. Industrial energy. 1990. №11. P. 52–55.
33. Abramovich B. J. Harmonics filters for the Sellenge converter station. GEC J. Sci. Tech. 1982. V. 48. P. 35–38.
34. Bashkirov O. V., Pershenkov P. P., Tyurin E. A. Detection of the consumer's contribution to the change in power quality indicators. Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality". 2009. Vol. 2. №1. P. 77–79.
35. Srinivasan K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions. IEEE Trans. on Power Delivery. 1996. V. 11. №2. P. 1003–1012.
36. Dell'Aquila A., Marinelli M., Monopoli V. G., Zanchetta P. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions. IEEE Trans. on Power Delivery. 2004. V. 19. №3. P. 1284–1290.
37. Yang H. Assessment for Harmonics Emission Level from one particular customer. University of Liege, 1992. 8 p.
38. Mayer V. Ya., Zenia. Methodology for detection the share contributions of the consumer and the energy supplying organization in decrease of power quality. Electricity. 1994. №9. P. 19–24.
39. Smirnov S. S., Kovernikova L. I. Consumer's contribution to the voltage levels of higher harmonics in the nodes of the electrical network. Electricity. 1996. №1. P. 56–64.
40. Kurbatskii V.G. Power quality and electromagnetic compatibility of technical equipment in power grids. Bryansk: BrSTU, 1999. 220 p.
41. Kartashev I. I., Ponomarenko I. S., Syromyatnikov S. Yu. Detection of the culprit for the decreasing of power quality in payments for electricity. EMAS. 2000. №19. P. 10–12.

42. Kartashev I. I., Ponomarenko I. S. Detection of the culprit of voltage distortions by instrumental control of power quality. Efficiency and power quality of electrical supply of industrial enterprises: Abstracts report International Scientific Conference. Donetsk, 2000. P. 337–340.
43. Gamazin S. I., Pétrovich V. A. On the question of determining the actual contribution of the consumer to the distortion of power quality parameters. Electrician. 2002. №7. C. 47–50.
44. Xu W., Liu Y. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling. IEEE Trans. on Power Delivery. 2000. V. 15. №2. P. 804–811.
45. Farhoodnea M., Mohamed Azah, Shareef H., Jabbar Khan R. A. An Improved Method for Determining Contribution of Utility and Customer Harmonic Distortions In A Power Distribution System. International Journal on Electrical Engineering and Informatics. 2010. V. 2. №3. P. 204–215.
46. Chaoying C., Xiuling L., Koval D., Xu W., Tayjasanant T. Critical Impedance Method – a New Detecting Harmonic Sources Method in Distribution Systems. IEEE Trans. on Power Delivery. 2004. V. 19. №1. P. 288–297.
47. Li C., Xu W., Tayjasanant T. A “critical impedance” – based method for identifying harmonic sources. IEEE Trans. on Power Delivery. 2004. V. 19. №2. P. 671–678.
48. Fernandez F. M., Chandramohan Nair P. S. Method for separation of customer and utility contributions of harmonics at point of common coupling. IET Generation, Transmission & Distribution. 2013. V. 7. №4. P. 374–381.
49. Vasiliev I. E., Klyuev R. V., Vasiliev E. I. Detection of the actual contribution of the consumer and the system to the non-sinusoidality voltage of non-ferrous metallurgy enterprises on the basis of an active experiment - connecting transformers for parallel operation. Audit and financial analysis. Computer Science and Informatics. 2011. №4. P. 0–4.
50. Abdullah A. R., Peng G. Z., Ghani S. A., Jopri M. H. A New Vector Draft Method for Harmonic Source Detection at Point of Common Coupling. IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014). Langkawi, The Jewel of Kedah, Malaysia. 2014. P. 110–114.
51. Adaleev A. S., Korovkin N. V. Method of localization of the source of interference in the electrical circuit. Izvestiya RAN. Energetics. 2009. №4. P. 98–107.
52. Korovkin N. V., Prihodchenko R. V., Tukhas V. A. Problems of searching a source of interference in general-purpose power grids. Electromagnetic Compatibility Technologies. 2011. №1(36). P. 50–58.
53. Korovkin N.V., Lysenko G.S. Technology of localization of sources of interference in power systems. Izvestiya RAN. Energetics. 2013. №2. P. 121–130.

Надійшла 28.06.2020
Received 28.06.2020

В.П. Калінчик, к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-4028-0185
В.А. Побігало, к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-2673-7329
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРИСТРІЙ КЕРУВАННЯ ОБМЕЖЕННЯМ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

На разі зростання рівнів та кількості струмів короткого замикання, існують проблеми, пов'язані з підвищенням ефективності методів та засобів обмеження струмів короткого замикання, які є актуальними у контексті розвитку енергетичного сектору України. Ключовим аспектом тут є інтенсифікація темпів зменшення витрат електроенергії у виробничих системах електропостачання (ВСЕП), що може бути досягнуто шляхом впровадження нових або з підвищеною ефективністю існуючих методів та засобів обмеження струмів короткого замикання. Присутня наукова та практична актуальність вдосконалення функціонування засобів обмеження струмів короткого замикання (КЗ), сформульована мета та завдання наукового дослідження. В якості рішення уперше запропоновано та досліджено спосіб управління обмеження струмів короткого замикання у ВСЕП з використанням струмообмежуючого реактора з керованим шунтом. Розроблено алгоритм дії системи «реактор - керований шунт». Вперше побудовано схему причинно-наслідкових зв'язків виникнення струмів КЗ у ВСЕП - використовуючи діаграму «аналізу кореневих причин» Ісікава, відповідно до ISO 9004. Запропонований спосіб обмеження струмів КЗ в ВСЕП і обладнання для його реалізації за схемою «реактор – керований шунт», яка повністю компенсує всі недоліки, що виникають при обмеженні струмів КЗ в ВСЕП за схемою обмеження «реактор - нерегульований шунт». Слід також зазначити, що обмеження струмів КЗ в ВСЕП за схемою «реактор - керований шунт» має певні суттєві переваги перед іншими існуючими на сьогоднішній день засобами обмеження струмів КЗ.

Ключові слова: струм короткого замикання, реактор, керований шунт.

Вступ. Серед проблем розвитку енергетичного комплексу України важливе місце в умовах зростання рівнів струмів короткого замикання (КЗ) займають питання підвищення ефективності методів і засобів їх обмеження. При цьому основним чинником є інтенсифікація темпів зменшення витрат електричної енергії у електропостачальних виробничих системах (ЕПВС), що може бути досягнуто реалізацією нових і підвищенням ефективності існуючих методів і засобів обмеження струмів КЗ. Якщо розглядати питання зменшення витрат електричної енергії шляхом модернізації і заміни обладнання, то такі рішення вимагають ретельного аналізу сучасних умов роботи електрообладнання, а так само і значних капітальних вкладень. Проблема ускладнюється тим, що в ЕПВС є значна кількість обладнання, яке потрібно замінити за умовами ймовірнісних струмів КЗ і обладнання з виробленим терміном служби або значним зносом, одночасно з цим промисловість не забезпечує потреби виробничих систем у відповідному електрообладнанні. Це призводить до того, що можливості існуючого струмообмежуючого обладнання не завжди використовуються ефективно, а капітальні вкладення можуть бути економічно невиправданими, також не враховуються можливості використання енергозберігаючих схемних рішень. Тому питання про такий спосіб вирішення даної проблеми необхідно вирішувати з урахуванням техніко-економічного аналізу.

Дослідження показують, що питання зниження витрат електричної енергії під час відсутності струмів КЗ у ЕПВС, потребують нових підходів при їх вирішенні [1-4]. Це пов'язано як з подальшим підвищенням ефективності функціонування засобів і методів обмеження струмів КЗ, що використовуються на сьогоднішній день, так і з активним використанням принципово нових засобів і методів обмеження струмів КЗ, а саме – пристроїв керування засобами обмеження струмів КЗ, з метою функціонального вдосконалення [1-4].

Проведений аналіз вже існуючих засобів і методів обмеження струмів КЗ свідчить, що до теперішнього часу використання пристроїв керування системами обмеження струмів КЗ не використовувалося. Необхідність та актуальність цих рішень доводить, що, підвищуючи ефективність засобів обмеження струмів КЗ, завдяки пристроям керування засобами обмеження струмів КЗ, можна знизити витрати, які пов'язані з обслуговуванням устаткування, що обмежує струми КЗ, за рахунок зменшення витрат у режимі відсутності аварійних процесів, а саме струмів КЗ, тобто здійснити реальне енергозбереження при обмежен-

ні струмів КЗ у ЕПВС [1-7]. На рис. 1. представлено приклад головної схеми електропостачання власних потреб ТЕЦ з реактованими лініями від генераторного розподільчого пристрою, де 1 - лінії робочого живлення; 2 - лінії резервного живлення; 1Р-8Р секції 6 кВ агрегатних власних потреб; 1СН, 2СН - секції 6 кВ загальностанційного навантаження; Т – трансформатор; LR – струмообмежуючий реактор; QF – вимикач високовольтний; I-VI електродвигуни блокового і загальностанційного навантаження. На даній схемі представлено приклад типових підключень одного із найбільш розповсюджених засобів обмеження струмів КЗ - струмообмежуючих реакторів LR, які використовуюються у ЕПВС для захисту від струмів КЗ у мережі 6-10 кВ. Лінійний реактор, що включається послідовно у відповідну лінію (приєднання), обмежує струм КЗ і підтримує відповідний рівень залишкової напруги в вузлах попередньо увімкненої мережі при КЗ. Лінійні струмообмежуючі реактори можуть бути індивідуальні - для однієї лінії і групові - для декількох ліній. Обмотки реакторів виконуються, як правило, з багатожильного ізолюваного проводу - мідного або алюмінієвого, на номінальні струми 630 А і більше. Однак, в ньому у безаварійному нормальному режимі роботи, тобто відсутність струмів КЗ, мають місце витрати активної і реактивної потужності, які призводять до витрат електричної енергії. Ця особливість роботи струмообмежуючих реакторів і є суттєвим недоліком, але враховуючи їх ефективність обмеження струмів КЗ у ЕПВС, слід відзначити, що застосування такого засобу має бути вдосконалено за допомогою впровадження пристроїв керування засобами обмеження струмів КЗ.

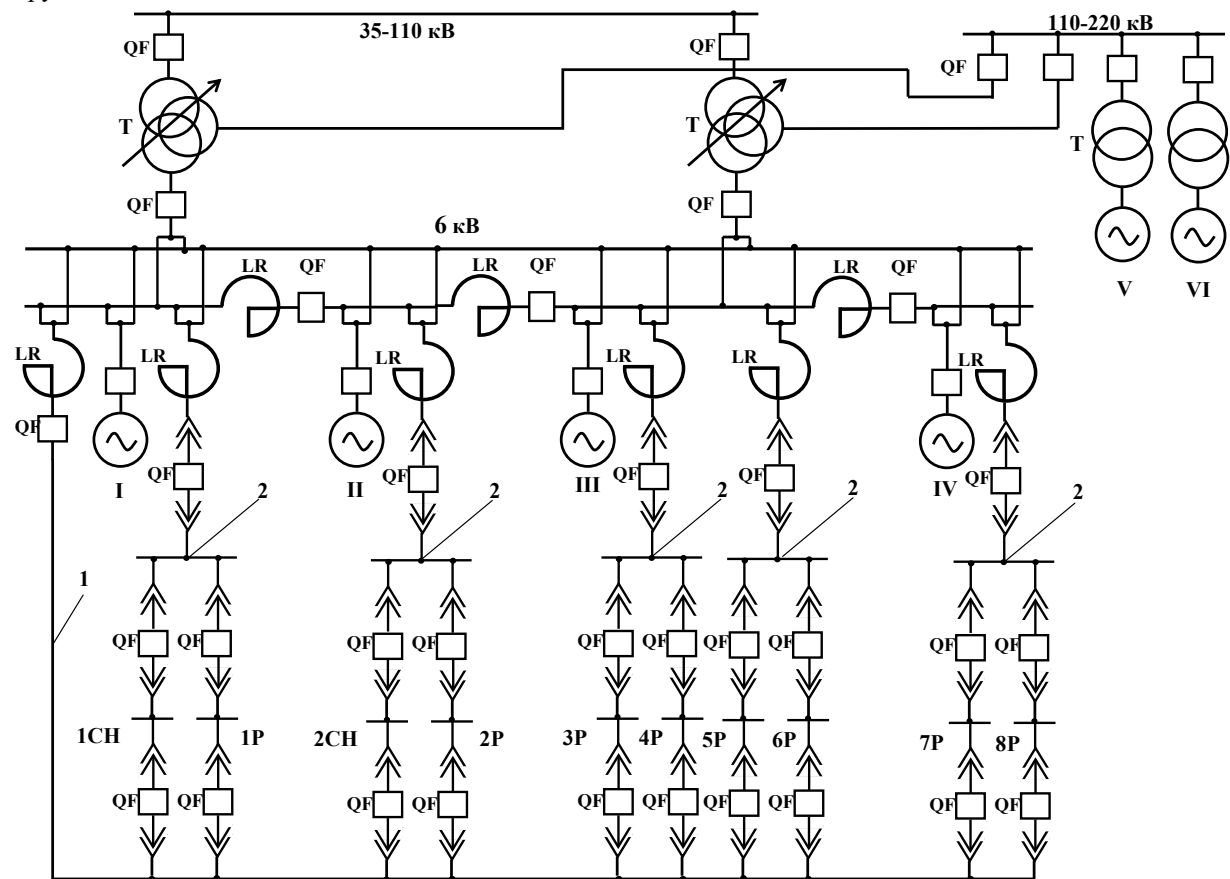


Рис. 1. Приклад головної схеми електропостачання власних потреб ТЕЦ

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування засобів обмеження струмів КЗ у виробничих системах за рахунок оптимізації режимів їх функціонування.

Для досягнення поставленої мети у статті необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз способів і засобів обмеження струмів КЗ у ЕПВС;
- розробити комплекс «реактор – керований шунт», що є методом керування засобами обмеження струмів КЗ;
- побудувати алгоритм роботи комплексу «реактор – керований шунт», як методу керування засобами обмеження струмів КЗ.

Спосіб керування обмеженням струмів КЗ за схемою «реактор – керований шунт». При експлуатації ЕПВС промислових в режимі роботи електроустановок і можуть вести до порушення електропостачання споживачів електроенергії. З огляду на основні причинно-наслідкові зв'язки виникнення

струмів КЗ можна побудувати схему причинно-наслідкових зв'язків виникнення струмів КЗ (схема Ісікави) [8, 9] згідно ISO 9004, що представлений на рис. 2.

Наслідками КЗ в електроустановках є: ушкодження електроустановки, знос ресурсу вимикачів, зниження рівня напруги в мережі, загоряння й інші прояви збитку. По своїй фізичній сутності струм КЗ є безперервно випадковим процесом. Сукупність характеристик, що описують ймовірний характер різних параметрів і умов КЗ, є ймовірними характеристиками КЗ в електроустановці.

З метою зменшення впливу струмів КЗ на електроустановки запропоновані і використовуються різні методи і засоби обмеження струмів КЗ. З огляду на специфіку розвитку ЕПВС, а також техніко-економічні характеристики розробляються і досліджуються принципово нові засоби обмеження струму КЗ, які дозволяють обмежувати не тільки величину струму КЗ, але і його тривалість.

Як відомо [1, 2, 5, 6], в Україні найбільш розповсюдженим засобом обмеження струмів КЗ у мережах 6-10 кВ є нерегульовані одинарні та двоєні бетонні реактори з лінійною характеристикою. Вони розрізняються конструктивним виконанням, а також технічними і техніко-економічними характеристиками і параметрами. Існує загальна класифікація реакторів з різним призначенням, що наведена в ГОСТ 18624-73 «Реакторы электрические. Термины и определения».

Поряд з існуючими способами і засобами обмеження струмів КЗ можуть бути застосовані технічні засоби керування обмеженням струмів КЗ. Зокрема, розглянемо спосіб керування засобами обмеження струмів КЗ, який може базуватися на теорії розпізнавання образів, застосування якої дозволяє розпізнавати нормальні, передаварійні та аварійні режими експлуатації ЕПС виробничих систем.

Для рішення задачі підвищення ефективності функціонування засобів обмеження струмів КЗ пропонується комплекс і спосіб керування обмеженням струмів КЗ у ЕПВС за схемою «реактор – керований шунт», у якому включення і відключення індуктивного опору здійснюється автоматично при виникненні струму КЗ [10-12].

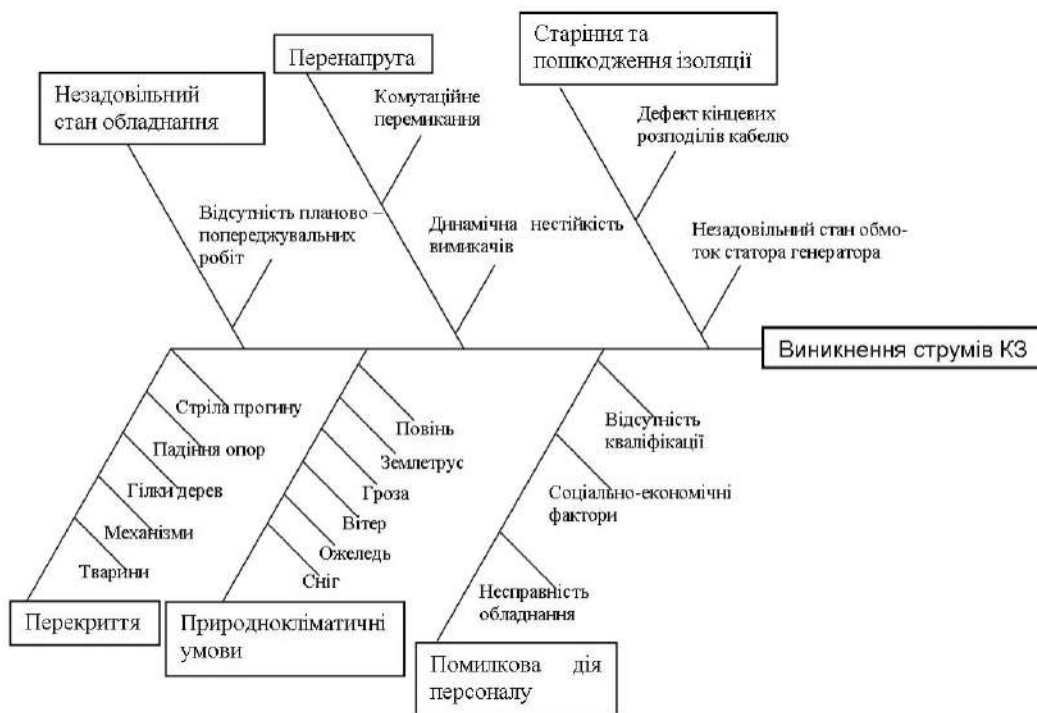


Рис. 2. Схема причинно-наслідкових зв'язків виникнення струмів КЗ

Структурна схема і принцип дії пристрою. Принцип дії пристрою, який застосовується в якості засобу керування обмеженням струмів КЗ, а саме, заснований на порівнянні вимірюваного струму з еталонним і формуванні керуючого сигналу, що впливає на індуктивний опір.

На рис. 3 представлена структурна схема запропонованого пристрою обмеження струму КЗ. У розріз електричної мережі 1 включений індуктивний опір (реактор, що обмежує струм КЗ) LR , який зашунтовано комутаційним елементом 5 (наприклад, індуктивно-динамічним пристроєм). До електричної мережі 1 підключений блок виміру 2, зв'язаний з аналізатором 3, керуючий вихід якого через пристрій 4 підключений до входу керування комутаційного елемента 5.

Періодично через відрізки часу Δt ($\Delta t = T/N$, де T – інтервал контролю, N – число точок контролю) вимірюють величину фактичного струму електричної мережі I_{fj} . Далі визначають величину неузгодженості ΔI_t між фактичним I_{fj} і заданим (еталонним) I_{te} струмом

за контрольований інтервал часу T

$$\Delta I_t = \sqrt{\sum_{t=1}^n (I_{tf} - I_{te})^2}, \quad (1)$$

де I_{te} – величина, що враховує умови навантаження, які виникає в момент пуску електродвигунів з номінальним струмом I_n (визначається з виразу $I_{te} = 1,8 I_n$); I_{tf} – величина фактичного струму електричної мережі.

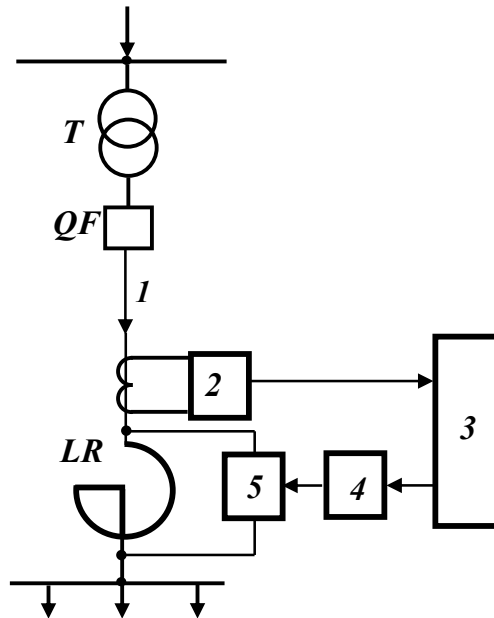


Рис. 3. Структурна схема запропонованого пристрою обмеження струму КЗ

У випадку, якщо $\Delta I_t \geq \delta I$, де величина δI (наприклад $\delta I = 0,1$), установлюється кроком дискретизації, формується керуючий вплив, що відключає комутуючий елемент.

У всіх інших випадках пристрій 3 формує сигнал керування для комутаційного елемента 5, що шунтує індуктивний опір LR . Після цього інформація з блоку виміру 2 знову надходить на аналізатор 3 [10-12].

У комплексі «реактор – керований шунт» використовується математичний метод нелінійного перетворення, який полягає в тім, що в процесі керування обмеженням струмів КЗ наданий для розпізнавання сигнал і еталон піддають нелінійному перетворенню і, як міру подібності, використовують функціонал

$$S = \int_0^T \{\varphi[x(t)] - \varphi[z(t)]\}^2 dt,$$

де φ – оператор перетворення.

Таким чином, вибирається відстань між сигналом та еталоном після їх нелінійного перетворення, мета якого є мінімізація цієї відстані, тобто ущільнення сигналів усередині одного класу при одночасному збільшенні відстані між сигналами та еталонами різних класів. Цей принцип базується на принципі стислих зображень, який формулюється теоремою Банаха [13-16].

Проектуючи систему «реактор – керований шунт» було доведено залежність статистичних ознак – функцій, які використовуються при побудові системи керування засобами обмеження струмів КЗ «реактор – керований шунт», від характеристик ймовірного процесу. Для цього було використано математичний апарат викиду ймовірних функцій. Було визначено, що математичне очікування статистичної ознак – функції випадкового процесу дорівнює густині розподілу ймовірності цього процесу, що усереднена за час аналізу

$$M[h(x)] = \frac{1}{T} \int_0^T f(x, t) dt.$$

Було також виведено залежності, які визначають перший і другий статистичні моменти ознак – функції по відомим одномірним і двомірним щільностям розподілу ймовірності вихідного випадкового процесу.

Алгоритм обмеження струму КЗ системою «реактор – керований шунт», наведено на рис. 4.

Запропонований спосіб обмеження струмів КЗ у ЕПВС та комплекс для його реалізації за схемою

«реактор – керований шунт» повністю компенсує недоліки, які мають місце при обмеженні струмів КЗ у ЕПВС за схемою «реактор – некерований шунт» [14]. Слід також обмеження струмів КЗ у ЕПВС за схемою «реактор – керований шунт» має певні переваги по відношенню до інших засобів обмеження струмів КЗ, зокрема:

- швидкодія та надійність;
- дотримання вимог з енергозбереження;
- можливість збору та якісного використання статистичних даних по струмам КЗ у ЕПВС;
- наявність подальшого розвитку та вдосконалення цієї системи обмеження струмів КЗ.

Економічне обґрунтування. Економічний ефект від впровадження запропонованого автоматичного пристрою управління обмеженням струмів КЗ визначається відповідно до методики [14].

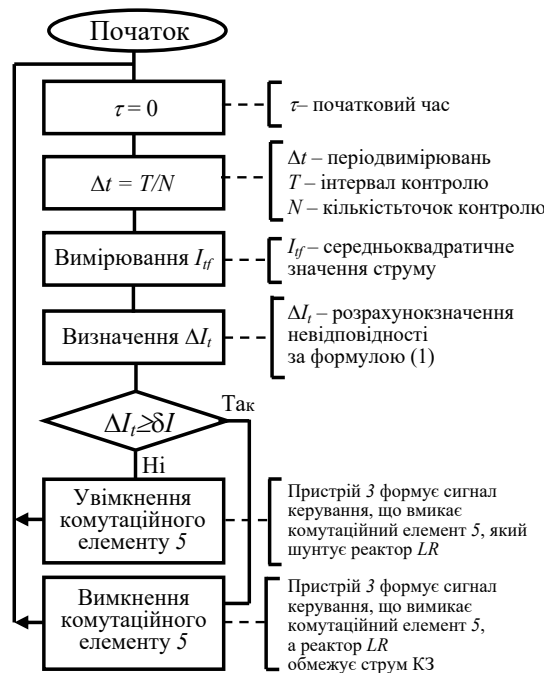


Рис. 4. Алгоритм роботи аналізатора

Після встановлення пристрою в мережі 6-35 кВ зниження сумарних витрат активної потужності в трифазних групах реакторів наступне:

$$\Delta P_{E\Sigma} = \left(1 - \frac{1}{K_2}\right) \sum_{i=1}^n 3 \Delta P_{ni} \left(\frac{I_{mi}^2}{I_{ni}^2}\right), \text{ кВт}$$

$$\text{де } K_2 = \frac{R_p (1 + K_1)^2}{(x_p K_1)}; \quad K_1 = \frac{R_{device}}{x_r}; \quad I_m = I_{device} + I_r;$$

де I_m - максимальний струм; P_n - номінальні витрати в реакторі; X_r - реактивний опір реактора; R_p - активний опір реактора; R_{device} - опір пристрою управління обмеженням струмів КЗ; I_r - струм, що протікає через реактор; I_{device} - струм, що протікає через пристрій управління обмеженням струмів КЗ; I_n - номінальний струм.

Реактивні витрати при $R_{device} \leq X_r$ усуваються практично повністю і сумарний технічний ефект складає

$$\Delta Q_{E\Sigma} = \sum_{i=1}^n 3 I_{mi}^2 X_{ri} 10^{-3}, \text{ квар.}$$

Річна економія активної (τ_a) та реактивної (τ_r) електроенергії визначається за часом витрат:

$$\tau_a = \left(0,124 \cdot \frac{T_{ma}}{10^4}\right)^2 \cdot 8760, \text{ год/рік};$$

$$\tau_r = \left(0,124 \cdot \frac{T_{mr}}{10^4}\right)^2 \cdot 8760, \text{ год/рік};$$

де T_{ma} , T_{mr} - максимальне число використання відповідно до активного і реактивного навантаження.

При цьому річна економія енергії в результаті встановлення пристрою управління обмеженням струмів КЗ складе (відповідно $\Delta W_{\Sigma P}$ – в кВт·год і $\Delta W_{\Sigma Q}$ – в квар·год):

$$\Delta W_{\Sigma P} = \Delta P_{E\Sigma} \tau_a$$

$$\Delta W_{\Sigma Q} = \Delta Q_{E\Sigma} \tau_r$$

Відповідно до діючих договірних відносин між оператором розподілу електричної енергії та споживачем в Україні, оплачується тільки фактична витрата електроенергії по ставках, встановлених для 1 і 2 класу промислових споживачів з приєднаною потужністю S . Виходячи із структури споживання електричної енергії пряма економія у вартісному вираженні для пристрою управління обмеженням струмів КЗ, що встановлюються в реактованих лініях, запишеться так

$$S = (\alpha \cdot \Delta W_{\Sigma P} + \gamma \cdot \Delta W_{\Sigma Q}) \cdot 10^{-2} =$$

$$= (\alpha \cdot \Delta P_{E\Sigma} \cdot \tau_a + \gamma \cdot \Delta Q_{E\Sigma} \cdot \tau_r) \cdot 10^{-2},$$

де α, γ – коефіцієнти активної і реактивної енергії відповідно.

В якості прикладу наведемо результати порівняльного розрахунку ефективності використання найбільш розповсюджених типів струмообмежуючих реакторів у виробничих системах 6-10 кВ за системою «реактор – керований шунт» (табл. 1), де прийняті такі позначення: I_n – номінальний струм струмообмежуючого реактора; x_r – номінальний індуктивний опір струмообмежуючого реактора; L_n – номінальна індуктивність; S – потужність струмообмежуючого реактора; ΔW_r – споживання електроенергії за місяць без використання системи «реактор – керований шунт»; ΔW_r^{CS} – споживання електроенергії за місяць з використанням системи «реактор – керований шунт».

Таблиця 1

Тип реактора	I_n , А	x_r , Ом	L_n , мГ	S , кВ·А	ΔW_r , кВт·год	ΔW_r^{CS} , кВт·год
РБА-6-400-3	400	3	0,827	4160	14506,2	1,22
РБА-6-600-4	600	4	0,735	6240	18048,4	1,78

Висновки.

У діючих умовах договірних відносин між оператором розподілу електричної енергії та споживачем електричної енергії в Україні у промислових мережах 6-10 кВ потрібно оперативне керування обмеження струмами КЗ, що стосуються зміни поточного режиму при проведенні планових заходів та при аварійних відключеннях тощо. Це неможливо без оперативного прогнозування режимів в умовах нормальної експлуатації і аварійних ситуаціях, яке має бути здійснено лише при відповідному програмному та апаратному оснащенні.

У роботі вперше запропоновано пристрій керування обмеженням струмів короткого замикання, де включення і відключення індуктивного опору (струмообмежуючого реактора) виконується автоматично (індуктивно-динамічним швидкодіючим пристроєм) в залежності від наявності або відсутності струму КЗ. Даний спосіб керування засобами обмеження струмів короткого замикання є перспективним та потребує подальшого розвитку та вдосконалення.

Отримані теоретичні і практично-дослідні результати, які надають підстави для подальшого розвитку нових методів і засобів обмеження струмів короткого замикання в виробничих системах електропостачання з урахуванням усіх особливостей договірних відносин між оператором розподілу електричної енергії та споживачем в Україні.

Список використаної літератури

1. Півняк Г.Г. Перехідні процеси в системах електропостачання. – Дніпро, 2016. 600 с.
2. Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И., Слесарев В.В. Эффективные режимы работы электротехнологических комплексов. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 184 с.
3. Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for institutions of higher education from Ukrainian by S.I. Kostritska and I.O. Tokar / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskiy, G.G. Pivnyak, Yu. L. Saenko, editorship of the English version and terminology by Professor O.B. Ivanov. – 2 nd edition. – D.: National Mining University. – 2013. – 239 p.
4. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education: under the editorship of G.G.Pivnyak / G.G.Pivnyak, I.V.Zhezhelenko, Y.A.Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University – 5-th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. – Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016. – 382 p.
5. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. - М.: BHV 2013г. 237 с.

6. Неклепаев Б.Н. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. – М.: Энас 2018г. 144с.
7. Kaoru Ishikawa. How to operate QC Circle Activities, Amer Society for Quality, 1985. ISBN 978-9999943109.
8. Kaoru Ishikawa. Guide to Quality Control, Asian Productivity Organization, 1986. ISBN 978-9283310358.
9. Розен В.П., Побігайло В.А. Засіб струмообмеження як один з способів ефективного енерговикористання // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2001. – № 421. – С. 181 – 188.
10. Розен В.П., Тарадай В.И., Несен Л.И., Побігайло В.А. Аналіз підходів до вирішення проблеми обмеження струмів короткого замикання у виробничих і енергетичних системах / ІЕЕ НТУУ «КПІ». – Київ.: 1999. – 18 с. – Рус. – Деп. в ГНТБ України 26.07.99, № 225 Ук99 // Анот. в ж. ВІНИТИ РАН № 10 (333), 1999.
11. Розен В.П., Соловей О.І., Момот Д.Є., Побігайло В.А. Математична модель роботи струмообмежувальних пристроїв за схемою «реактор – запобіжник» // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія гірництво. – 2000 р. – № 4. – С. 82 – 90.
12. El-Kady M.A. Probabilistic short-circuit analysis by Monte Carlo simulations // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1998. № 5. P. 1308-1316.
13. Патент України № 2002021620 від 15.11.2002 р. Спосіб обмеження струмів КЗ і пристрій для його реалізації. В.П. Розен, В.П. Калинчик, Д.Е. Момот, В.А. Побігайло.
14. Скловська Е.Г., Сердюк Б.Н. Економіка енергетики. Підручник. Затверджено ВР НТУУ «КПІ» імені Ігоря Сікорського. – Київ.: Видавництво «Каравела», 2015. - 378 с.

V. Kalinchyk, PhD, Assoc. Prof., **ORCID 0000-0003-4028-0185**

V. Pobigaylo, PhD, Assoc. Prof., **ORCID 0000-0003-2673-7329**

**National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

SHORT CIRCUIT CURRENT CONTROL DEVICE TO INCREASE THE EFFICIENCY OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Amid growing levels of short-circuit currents, issues related to increasing the efficiency of methods and means of limiting short-circuit currents are central in the context of development of Ukraine's energy sector. A key factor here is intensifying pace of decreasing electricity losses in power supply production systems (PSPS), which could be achieved through implementation of new and improved efficiency of existing methods and means of limiting short circuit currents. The scientific and practical relevance of improving the functioning of credit limit short – circuit (short circuit), formulated the goal and objectives of research. As a solution proposed research and the way to manage complex limitation of short circuit currents in electricity supply production systems under the reactor – controlled shunt. The algorithm of the system reactor – controlled shunt. For the first time the schemes cause – effect relationships occurrence of short – circuit currents – Figure Ysikavy according to ISO 9004. The proposed method of limiting short circuit currents in the PSPS and the suite for its implementation under the controlled shunt reactor scheme fully compensates for all the disadvantages that occur when limiting short circuit currents in the PSPS under the unregulated shunt reactor scheme. It should also be noted that the limitation of short circuit currents in the PSPS under the controlled shunt reactor scheme has certain advantages over other means of limiting short circuit currents.

Keywords: short-circuit current, reactor, Ishikawa, ISO 9004 performance, limitations, fuse, controlled shunt, reduced losses.

REFERENCES

1. Pivnyak, H.H. Perekhidni protsesy v systemakh elektropostachannya [Transients in Electric Power Supply Systems]– Dnipro [in Ukrainian].
2. Shylovskiy, A.K., Pivnyak, H.H., Vypanasenko, S.I., Slesarev, V.V. Effektivnye rezhimy raboty elektrotekhnologicheskikh kompleksov [Effective modes of operation of electrotechnological complexes]. – Dnepropetrovsk: NGA Ukrainy [in Russian]
3. Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for higher education institutions from Ukrainian by S.I. Kostritska and I.O. Tokar / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskiy, G.G. Pivnyak, Yu. L. Saenko, editorship of the English version and terminology by Professor O.B. Ivanov. - 2nd edition. - D.: National Mining University. - 2013. - 239 p.

4. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for higher education institutions: under the editorship of G.G.Pivnyak / G.G.Pivnyak, I.V.Zhezhelenko, Y.A.Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University - 5th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. - Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016.- 382 p.
5. Neklepayev, B.N. Elektricheskaya chast' elektrostantsiy i podstantsiy [The electrical part of power plants and substations]. M.: BHV 2013. -237 p. [in Russian]
6. Neklepayev, B.N. Rukovodyashchiye ukazaniya po raschetu tokov korotkogo zamykaniya i vyboru elektrooborudovaniya [Guidelines for the calculation of short circuit currents and the selection of electrical equipment]. – M.: Enas 2018. -144 p. [in Russian]
7. Kaoru Ishikawa. How to operate QC Circle Activities, Amer Society for Quality, 1985. ISBN 978-9999943109.
8. Kaoru Ishikawa. Guide to Quality Control, Asian Productivity Organization, 1986. ISBN 978-9283310358.
9. Rozen V.P., Pobihaylo, V.A. Current limiter as one of the ways of efficient energy use // Bulletin of the National university "Lviv Polytechnic". Electric power and electromechanical systems[in Ukrainian]
10. Rozen, V.P., Taraday, V.I., Nesen, L.I., Pobihaylo V.A. Analysis of approaches to solving the problem of limiting short-circuit currents in production and power systems / Abstract in the bulletin of VINITI RAN - All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences[in Ukrainian]
11. Rozen, V.P., Solovey, O.I., Momot, D.E., Pobihaylo, V.A. Mathematical model of current limiting devices according to the scheme "reactor - fuse" // Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Mining series[in Ukrainian]
12. El-Kady, M.A. Probabilistic short-circuit analysis by Monte Carlo simulations // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1998. No. 5. p. 1308-1316.
13. Patent Ukrayiny № 2002021620 vid 15.11.2002 r. Sposib obmezheniya strumiv KZ i prystryi dlya yoho realizatsiyi [Patent of Ukraine No. 2002021620 of 15.11.2002 Method for limiting short circuit currents and the device for the method implementation] V.P. Rozen, V.P. Kalynchyk, D.E. Momot, V.A. Pobihaylo [in Ukrainian]
14. Sklovska E.H., Serdiuk B.N. Ekonomika enerhetyky [Energy Economics]. Textbook. – Kyiv.: Vydavnytstvo «Karavela»[in Ukrainian].

Надійшла 28.07.2020
Received 28.07.2020

С.В. Зайченко, проф. д-р, ORCID 0000-0002-8446-5408
В.О. Шаленко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-6984-0302
С.В. Король, канд. техн. наук, доц, ORCID 0000-0003-6521-6322
С.П. Шевчук, проф. д-р, ORCID 0000-0002-0593-326X
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ З РОЛИКОВИМ ПРИВОДОМ

В роботі представлено загальну концепцію створення системи очищення магістральних трубопроводів пристроєм з роликів приводом з використанням енергії потоку нафти. Аналітично доведено доцільність використання очисних пристроїв з роликів приводом щіток. Застосування даної системи дозволяє зменшити час і трудовитрати при проведенні очисних робіт магістральних трубопроводів за рахунок багатократної дії щіток які рухаються по гвинтовій траєкторії. Запропоновано нову конструкцію внутрішньотрубного пристрою з роликів приводом щіток яка дозволяє використати енергію потоку нафти для створення обертого моменту приводу щіток. На основі рівнянь механіки контактної взаємодії і теорії руху колісних транспортних засобів встановлено рівняння максимальної потужності роликів приводу обертання ротора очисного пристрою. Аналіз залежності свідчить про синусоїдальну залежність зміни потужності роликів приводу обертання ротора очисного пристрою від кута повороту ролика і лінійну від коефіцієнта проковзування і швидкості.

Ключові слова: магістральний трубопровід, очисний пристрій, ролик, потужність, контактна взаємодія

Вступ

Транспортування рідких речовин за допомогою трубопроводів є одним із широко вживаних у світі засобів для їх транспортування від виробника до споживачів, особливо коли відстань між ними є значною. Згідно Закону України «Про трубопровідний транспорт» магістральний трубопровід є технологічним комплексом, який функціонує як єдина система і до якого входить окремий трубопровід з усіма об'єктами і спорудами, які зв'язані з ним єдиним технологічним процесом, або кілька трубопроводів, якими здійснюються транзитні, міждержавні, міжрегіональні поставки продуктів транспортування споживачам. В Україні трубопровідний транспорт використовують для перекачування газу, нафтопродуктів, нафти та аміаку. У порівнянні з іншими видами транспорту трубопровідний транспорт більш практичний та економічно доцільний для транспортування великих обсягів, однак мають фактори небезпеки. Зокрема, існує ризик пошкодження трубопроводів, що може призвести до екологічного забруднення значних територій навколо нього. При аварії на газопроводі чи нафтопроводі в атмосферу потрапляє метан та його гомологи, вуглекислий газ та пари нафти, які впливають на центральну нервову систему, органи дихання тварин та людей, крім цього підвищується парниковий ефект.

В зв'язку з цим особливу увагу заслуговують сучасні методи очищення нафтових магістральних трубопроводів від парафіносмолистих відкладень [1-4]. Парафіносмолисті відкладення погіршують гідравлічні характеристики магістральних трубопроводів в наслідок зменшення перетину. Також парафіносмолисті відкладення суттєво впливають на процес діагностування магістральних трубопроводів внутрішньотрубними діагностичними пристроями. Причиною погіршення достовірності отриманих результатів за допомогою методів ультразвукової і магнітної дефектоскопії утворення проміжку між датчиками і випромінювачами внутрішньотрубних діагностичних пристроїв і стінкою магістрального трубопроводу.

Для запобігання збільшення гідравлічного опору магістральних трубопроводів і підвищення достовірності отриманої діагностичної інформації за допомогою методів ультразвукової і магнітної дефектоскопії встановлено комплекс заходів націлених на очищення внутрішніх стінок магістральних нафтових трубопроводів. Основними етапами даних заходів є пропуск спеціальних внутрішньотрубних очисних і калібруючих пристроїв. Для досягнення певної якості очищення поверхні по всій довжині трубопроводу пропускаються 3-4 рази очищуючі скребки. Процес пуску і проходження по всій довжині трубопроводу внутрішньотрубного очисного пристрою достатньо тривалий, що пов'язано з низькою швидкістю руху нафти (2 м/с). Основними існуючими шляхами інтенсифікації процесу очищення є підвищення температури нафти, застосування хімічних реагентів, використання скребок спеціальної кон-

© С.В. Зайченко, В.О. Шаленко, С.В. Король, С.П. Шевчук, 2020

струкції з щітками і катками. Застосування хімічних реагентів у вигляді поверхневоактивних речовин значно погіршує якість нафти, а використання нагрівання потребує спеціальних додаткових витрат енергії, комплексу обладнання і конструкції трубопроводу. Також використання нагрівання має різну дію по довжині трубопроводу, що пояснюється охолодженням нафти під час руху. Використання щіток і катків підвищує незначно інтенсивність очищення в наслідок їх однократної дії.

Виходячи з вище сказаного, розробка нових методів і конструкції засобів для очищення внутрішньої поверхні трубопроводу з метою підвищення пропускних здібностей і проведення діагностичних робіт є актуальною задачею.

Мета і завдання дослідження

Метою даного дослідження є розробка нової конструкції пристрою для очищення внутрішньої поверхні магістрального трубопроводу і методики розрахунку головних геометричних і енергосилових параметрів з врахуванням особливостей механіки контактної взаємодії робочих органів з оброблюваним середовищем.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

- Розробка принципово нової конструкції внутрішньотрубного очисного пристрою який дозволяє збільшити дію щіток за один прохід;
- Дослідження процесів контактної взаємодії елементів очисного простору з оброблюваним середовищем;
- Створення рекомендацій розрахунку головних геометричних і енергосилових параметрів з врахуванням особливостей механіки контактної взаємодії робочих органів з оброблюваним середовищем.

Матеріал і результати дослідження

Авторами запропоновано принципово нову конструкцію внутрішньотрубного очисного пристрою який дозволяє збільшити дію щіток за один прохід (рис. 1). Для приводу очисного пристрою традиційно використано ущільнюючі манжети 1 які прикріплені до корпусу 2 при дії на які потоку нафти відбувається переміщення по довжині трубопроводу (напрямок показано стрілкою). При русі очисного пристрою встановлені на ротор 3 роликів 4 взаємодіють з поверхнею стінки трубопроводу змушуючи обертатись щітки 5. Контакт між роликками і стінкою трубопроводу забезпечується системою з кронштейна 6 важеля 7 і пружини 8. Для обертання ротора очисного внутрішньотрубного пристрою навколо корпусу використано пару підшипників 9. Момент, що змушує обертатись ротор створюється в результаті контактної взаємодії встановлених під кутом θ роликів з внутрішньою поверхнею труби.

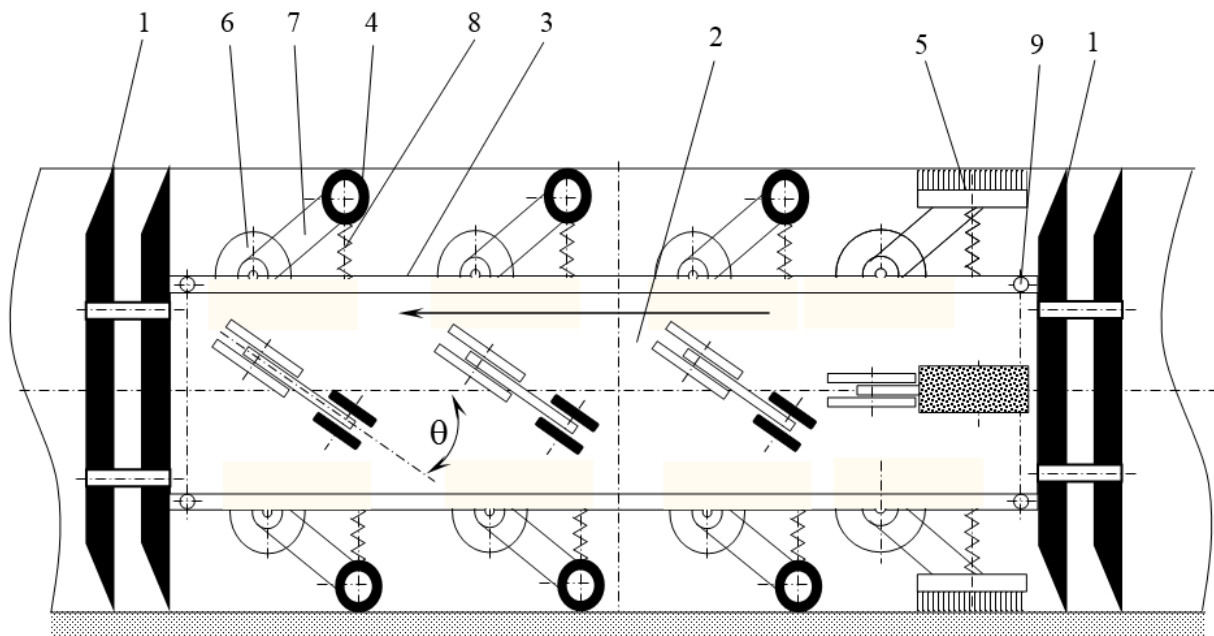


Рис. 1 Схема внутрішньотрубного пристрою з роликвим приводом щіток

В основу математичного опису взаємодії ролика внутрішньотрубного очисного пристрою з використано теорію руху колісних транспортних засобів і механіки контактної взаємодії з врахуванням особливостей механіки контактної взаємодії робочих органів з оброблюваним середовищем [6-11].

Для визначення взаємозв'язку головних параметрів головних геометричних і енергосилових параметрів розглянемо контактну взаємодію ролика з поверхнею труби. Розрахункова схема складається з двох: півпростору обмеженого циліндричною поверхнею і ролика (рис. 2).

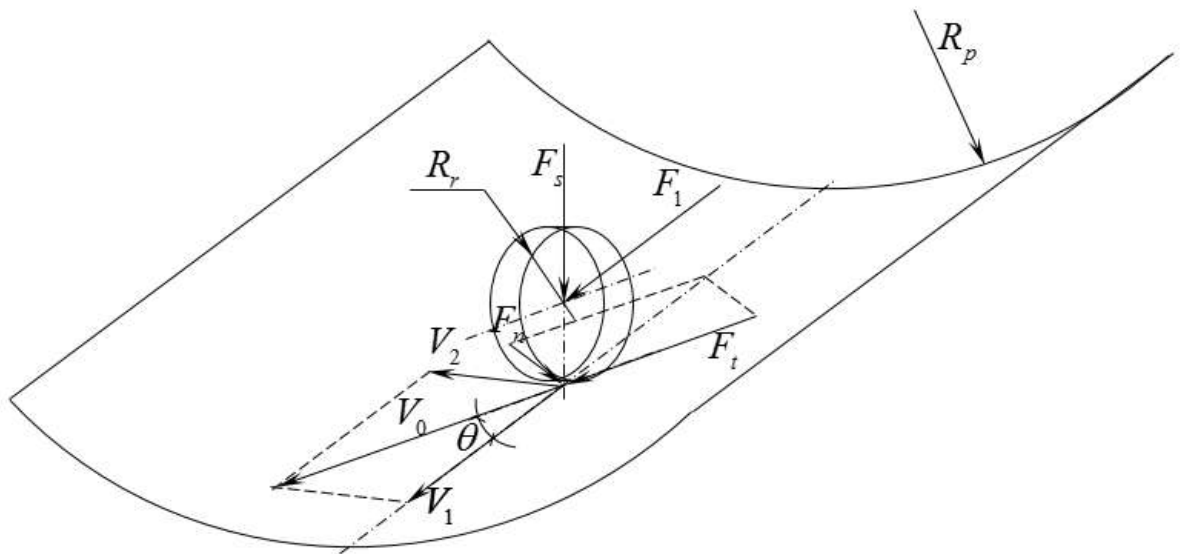


Рис. 2 Розрахункова схема визначення головних параметрів головних геометричних і енергосилових параметрів

Для визначення кінематичних параметрів системи розкладемо вектор швидкості руху ролика V_0 на дві взаємно перпендикулярні складові спрямованих поздовж V_1 і перпендикулярно V_2 напрямку руху очисного пристрою:

$$V_0 = \frac{V_1}{\cos \theta}; \quad (1)$$

$$V_2 = V_1 \cdot \operatorname{tg} \theta. \quad (2)$$

З врахування проковзування:

$$V_2 = \xi \cdot V_1 \cdot \operatorname{tg} \theta. \quad (3)$$

де ξ – коефіцієнт проковзування.

Кутова швидкість ротора:

$$\omega = \frac{\xi \cdot V_1 \cdot \operatorname{tg} \theta}{R_p}. \quad (4)$$

де R_p - внутрішній радіус трубопроводу.

З відношення швидкостей 1, 2 дозволяє встановити коефіцієнт збільшення дії щіток ϵ відношенням двох варіантів траєкторій руху, з обертанням щіток і без обертання:

$$k = \frac{\xi}{\cos \theta}. \quad (5)$$

Так при зміні кута повороту ролика з 10 до 80° дозволяє збільшити ефективність дії щіток з 1,01 до 6 разів.

Визначення енергосилових параметрів процесу очищення магістральних трубопроводів внутрішньотрубними пристроями з роликівим приводом можливо визначити шляхом встановлення розподілу канатних зусиль. На ролик від корпусу очисного пристрою передається зусилля F_1 . Дане зусилля можливо розкласти дві складові: поздовжню, яка паралельна площині обертання ролика F_t , і бокову, яка перпендикулярна до площини обертання F_n :

$$F_t = F_1 \cos \theta; \quad (6)$$

$$F_n = F_1 \sin \theta. \quad (7)$$

Складова F_t урівноважується силою тертя кочення, як пропорційна силі притискання F_s і коефіцієнту тертя кочення.

Момент від дії сили F_n відносно осі обертання ротора:

$$M_r = R_p F_n = R F_1 \sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} R F_1 \sin 2\theta. \quad (8)$$

Максимальне значення зусилля F_1 обмежено силою тертя між роликом і поверхнею трубопроводу:

$$F_1^{\max} = \mu F_s. \quad (9)$$

де μ - коефіцієнт тертя.

Також можливий максимальний крутний момент від ролика залежить від загального зусилля яке розвиває очисний пристрій за рахунок перепаду тисків які виникають перед і після очисного пристрою у трубопроводі:

$$n F_1^{\max} = \frac{\Delta p \pi R_p^2}{n}. \quad (10)$$

де Δp - перепад тисків які виникають перед і після очисного пристрою у трубопроводі;

n - кількість приводних роликів

Також необхідно виконати умову кочення ролика в площині їх обертання при обертанні []:

$$\theta < \arccos \frac{f}{\mu}, \quad (11)$$

де f - коефіцієнт тертя кочення.

Враховав залежності 8-11 встановимо максимальну потужність роликового приводу обертання ротора очисного пристрою:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \min \left(\frac{n \mu F_s}{\Delta p \pi R^2} \right) \cdot \sin 2\theta \cdot \xi \cdot V_1 \cdot \operatorname{tg} \theta. \quad (12)$$

На рис. 3 представлено зміну потужності роликового приводу обертання ротора очисного пристрою в залежності від кута повороту ролика до осі трубопроводу θ .

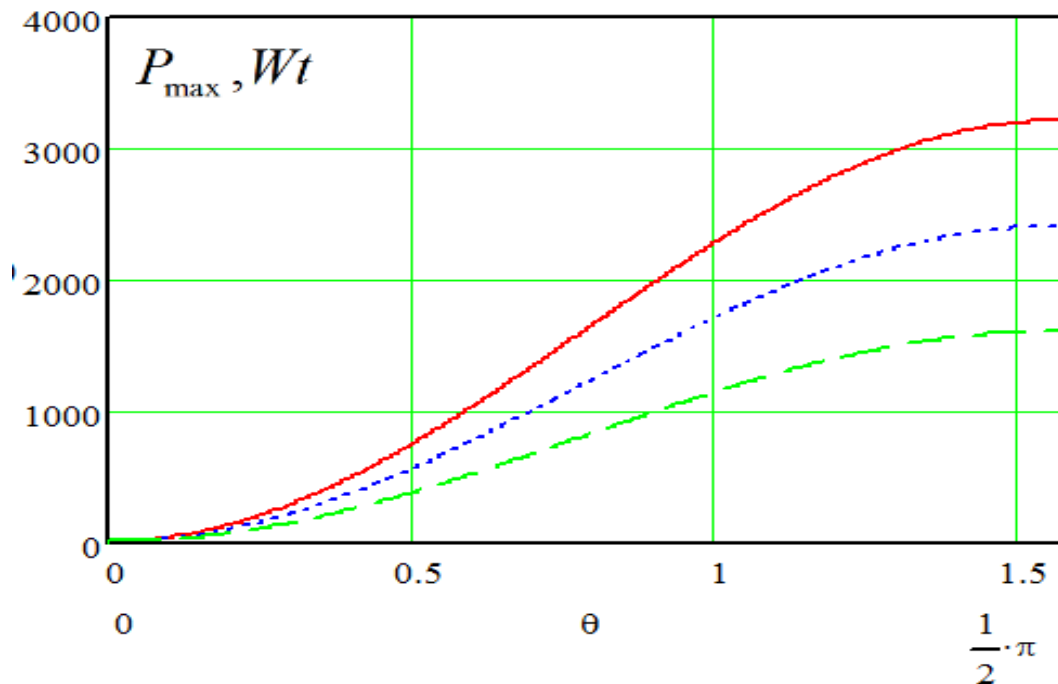


Рис. 3 Графік зміни потужності роликового приводу обертання ротора очисного пристрою в залежності від кута повороту ролика θ ($V_1 = 1 \text{ м/с}$, $\xi = 1; 0,75; 0,5$, $\mu = 0,4$, $n = 8$, $F_s = 500 \text{ N}$)

Аналіз графіку (рис. 3) свідчить про синусоїдальну залежність зміни потужності роликового приводу обертання ротора очисного пристрою в залежності від кута повороту ролика θ .

На основі наведених розрахунків розроблено конструкцію пристрою для очищення магістральних трубопроводів з роликовим приводом (рис.4).

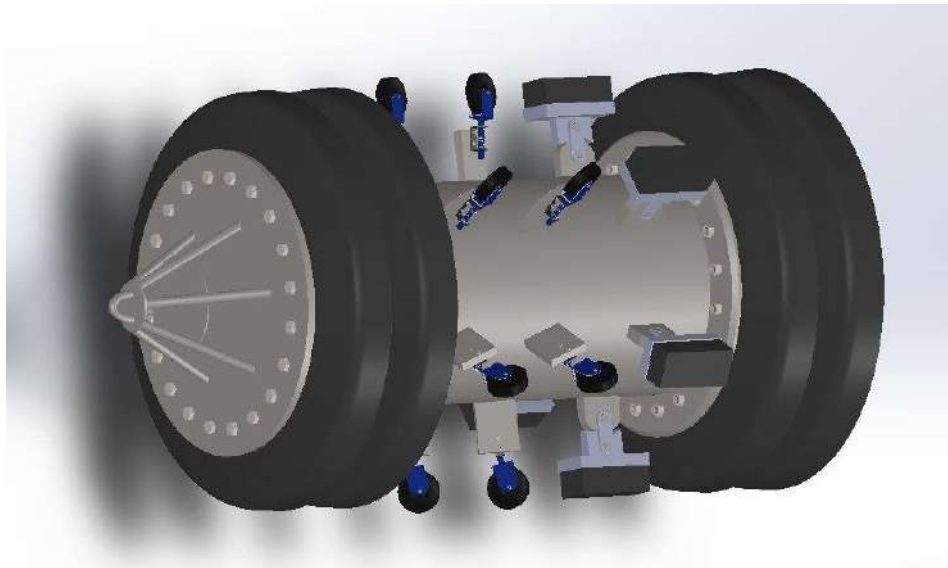


Рис. 4 Зовнішній вигляд очисного пристрою

Висновки

1. В роботі представлено загальну концепцію створення системи очищення магістральних трубопроводів очисним пристроєм з роликівим приводом. Доведено доцільність використання очисних пристроїв з роликівим приводом щіток. Застосування даної системи дозволяє зменшити час і трудовитрати при проведенні очисних робіт магістральних трубопроводів. Так ефективність застосування пристрою визначена, як відношенням двох варіантів траєкторій руху, з обертанням щіток і без обертання. При зміні кута повороту ролика з 10 до 80° ефективність застосування пристрою збільшується в 6 разів.

2. Запропоновано нову конструкцію внутрішньотрубного пристрою з роликівим приводом щіток яка дозволяє використати енергію потоку нафти для створення обертового моменту приводу щіток.

3. Встановлено рівняння максимальної потужності роликівого приводу обертання ротора очисного пристрою. Аналіз залежності свідчить про синусоїдальну залежність зміни потужності роликівого приводу обертання ротора очисного пристрою від кута повороту ролика і лінійну від коефіцієнта проковзування і швидкості.

REFERENCES

1. Quarini, J., & Shire, S. (2007). A Review of Fluid-Driven Pipeline Pigs and their Applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 221(1), 1–10.
2. Quarini J. Ice-pigging to reduce and remove fouling and to achieve clean-in-place // *Applied Thermal Engineering*. – 2002. – Т. 22. – №. 7. – С. 747-753.
3. Money N. et al. Dynamic speed control in high velocity pipelines // *Pipeline Gas J.* – 2012. – Т. 239. – С. 30-38.
4. Tiratsoo J. N. H. (ed.). *Pipeline pigging technology*. – Gulf Professional Publishing, 1992.
5. Zaichenko S. V. et al. MECHATRONIC COMPLEX OF DIAGNOSTIC OF MAIN PIPELINES // *Scientific journal "Energy: Economics, Technologies, Ecology"*. - 2018. - №. 3. - P. 139-148.
6. Емельянов И. С. Кинематика параметров бортового поворота мобильных колесных геомехатронных устройств / Емельянов И. С., Зайченко С. В., Шевчук С. П. // *Перспективы развития строительных технологий : материалы 12-ї Міжнарод. наук.-практич. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів*, 20 квітня 2018 р., м. Дніпро. - Дніпро : НГУ, - С. 47 - 50.
7. Zaichenko S. et al. Development of a geomechanic complex for geotechnical monitoring contour mine groove // *Eastern-European J. Enterprise Technologies*. – 2017. – Т. 3. – №. 9. – С. 87.
8. Зайченко С. В. Контактна взаємодія робочих органів безвібраційних бетоноформуючих агрегатів при виробництві пустотних панелей // *Автореферат дис. на здобуття наукового ступеню к. т. н.* – Київ. – 2001.
9. Гарнець В. М. и др. Бетоноформувальні агрегати // *Конструктивно-функціональні схеми, принцип дії, основи теорії*. К.: Інтерсервіс. – 2015.
10. Гарнець В. и др. Теорія і практика створення бетоноформувальних агрегатів (БФА) // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. – 2014. – №. 83. – С. 61-68.
11. Zaichenko S. et al. Development of a geomechatronic complex for the geotechnical monitoring of the contour of a mine working // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2017. – №. 3 (9). – С. 19-25.

S. Zaichenko, prof. Dr., ORCID 0000-0002-8446-5408

V. Shalenko, PhD, ORCID 0000-0002-6984-0302

S. Korol, PhD, ORCID 0000-0003-6521-6322

S. Shevchuk, prof. Dr., ORCID 0000-0002-0593-326X

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

DETERMINATION OF THE MAIN POWER PARAMETERS OF DEVICES FOR CLEANING OF MAIN PIPELINES WITH A ROLLER DRIVE

The paper presents the general concept of creating a system for cleaning main pipelines by a device with a roller drive using the energy of oil flow. The expediency of using cleaning devices with a roller brush drive has been analytically proved. Application of this system allows to reduce time and labor costs when carrying out cleaning works of the main pipelines. The effect is achieved due to the repeated action of the brushes moving along the helical trajectory. A new design of the in-tube device with a roller drive of brushes is offered. The drive allows you to use the energy of the oil flow to create the torque of the brush drive. Based on the equations of contact interaction mechanics and the theory of motion of wheeled vehicles, the equation of maximum power of a roller drive is established. The dependence analysis shows a sinusoidal dependence of the change in the power of the roller drive of the rotation of the rotor of the treatment device on the angle of rotation of the roller and linear on the sliding coefficient and speed.

Keywords: *main pipeline, cleaning device, roller, power, contact interaction mechanics*

Надійшла 23.04.2020

Received 23.04.2020

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

D. Matushkin, Ph.D. student, ORCID 0000-0003-4431-7862
A. Bosak, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0545-9980
L. Kulakovskiy, Cand. Sc. (Eng.), Assis. Prof., ORCID 0000-0003-1273-6894
V. Dubovyk, Assis. Prof., ORCID 0000-0001-8884-8222
S. Priadko, Assis. Prof., ORCID 0000-0003-1078-6812
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

MODELING OF AIRCRAFT STEERING CONTROL SYSTEM WITH TRACTION ELECTRIC DRIVE BY USED AN ADAPTIVE FUZZY CONTROLLER

One of the main tasks of the last two decades is to find ways to optimize energy consumptions for aircrafts. The commercial aviation business is increasingly using environmental monitoring systems and electrical control by using AC and DC tires. One of the trends in the development of aircraft control systems is the replacement of hydraulic and pneumatic systems with electrical ones. The aerospace industry and airlines are interested in performing steering operations without major engines. This operation method allows to save fuel, reduce brake wear, eliminates towing and achieve decreasing of environmental pollution. In the future it is necessary to implement electric steering using a traction drive (TD) based on a synchronous motor with permanent magnets (PMSM). This system is powered by an available auxiliary power unit or other sources such as fuel cells or batteries. This study presents a highly efficient electric steering system as a modern solution for improving the ground operations of modern aircraft powered by main engines. The system was investigated using steering profiles for takeoff and landing. The study determined the effectiveness of its use for steering. The influence of external factors and the change of parameters of the electromechanical system of wheel with an elastic tire were investigated. The results of modeling the dynamic processes of an electromechanical system containing elastic links in the conditions of parametric perturbations confirmed the robust stabilization of dynamic control quality indicators based on the laws of fuzzy logic.

Keywords: control system, traction electric drive, aircraft steering, fuzzy regulator.

Introduction

The main factor that has influence for the choice of electric steering system (ESS) is the size of the aircraft. Several studies on the topic of electric steering have focused on small or medium-sized commercial aircraft [4,5]. Therefore, in order to define the maximum possible performance of possible applications of ESS, one of the large modern medium-sized aircraft was selected for the study. Considering huge mass of large aircraft, the ESS with current performance for traction engines and especially energy saving system devices are not viable. The decision to select one of the largest medium-sized aircraft for today and determine the parameters of the ESS for it requires the use of traction engines. These engines have similar characteristics to the most powerful engines currently available on the market.

In this work, a commercial Airbus A321 aircraft was selected for the study.

Purpose and objectives. The aim is to achieve the required quality parameters of the steering system based on the development of adaptive control algorithms. These indicators should provide an increasing of dynamic accuracy and stabilization of characteristics of the electrotechnical complex of electric drive by change of parameters, elasticity, external perturbations and loading at the uncertainty conditions.

Material and research results. One of the most important stages in the development of a fully functional system is the process of determining the appropriate design requirements. This general statement is generally

© Д. С. Матушкін, А. В. Босак, Л. Я. Кулаковський, В. Г. Дубовик, С. Л. Прядко, 2020

accepted and applies to any product or system development process. In order to determine the requirements for a satisfactory design of the ESS, 20 aircraft motion profiles were recorded using a GPS device. These profiles are called drive cycles or steering cycles. In the first stage, 10 take-off and 10 landing motor movement profiles are evaluated to analyze the performance of conventional aircraft steering. Next, for medium-sized aircraft, performance parameters are selected in accordance with the conditions that satisfy the kinematic performance requirements of most available drive cycles.

In the period from December to June for different types of conventional steering operations, speed profiles had been recorded at the time when the aircraft were moving on the ground before take-off and after landing. Control profiles were registered by a GPS device at various airports in North America, Europe and Ukraine. A total of 20 steering cycles were recorded. The places where the cycles were recorded are given in table. 1.

Table 1 – Available steering cycles

Airports take off cycles	Airports of landing cycles
Calgary, Canada (1)	Brussels, Belgium (2)
Dallas / Fort Worth, USA (2)	Calgary, Canada (1)
Frankfurt am Main, Germany (1)	Dallas / Fort Worth, USA (2)
Lviv, Ukraine (1)	Frankfurt am Main, Germany (2)
London Heathrow, United Kingdom (2)	London Heathrow, United Kingdom (1)
Boryspil, Ukraine (3)	Boryspil, Ukraine (2)

In fig. 1-8 four profiles of the steering cycle are shown. Examples of take-off cycles and their corresponding GPS-observation are described in Fig. 1-4. In Fig. 5 and Fig. 6 two different landing cycles are shown. The aircraft steering cycle at Boryspil Airport begins with the delay phase before the shock. From 25 to 80 seconds the aircraft is in reverse move (low speed phase). The aircraft remains in place after disconnecting the tractor from the nose gear of the aircraft. This is because the main engines must be warmed up before starting normal operation. The aircraft exits the gate from the place where the main engines reach the desired temperature. It marks the starting point for the take-off process (after 220 s). At this stage, the aircraft moves solely due to the main engines. The aircraft steers to the runway without a stop, but with frequent changes in speed, which lead to changes in acceleration and deceleration.

As soon as the plane reaches the runway, it stops to wait for permission to take off from the tower. Once the permit is issued, the aircraft enters the take-off stage and leaves the airport. This steering cycle is a good example of the take-off steering process without stopping forward move.

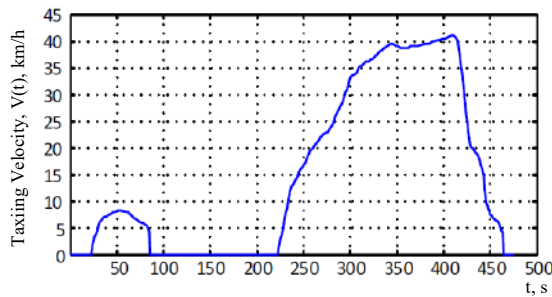


Fig. 1 – Boryspil Airport, Ukraine – Take-off Drive Cycle № 2



Fig. 2 – Boryspil Airport, Ukraine – Take-off Drive Cycle № 2

The take-off steering cycle at Lviv Airport (Fig. 3, Fig. 4) is an example of a cycle with several stops before take-off. After the initial countdown (from 40 to 120 s), the planes stop at several intersections.

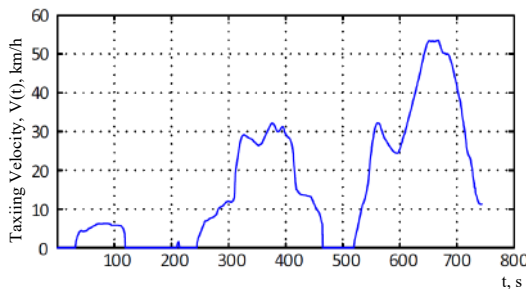


Fig. 3 – Lviv International Airport, Ukraine –

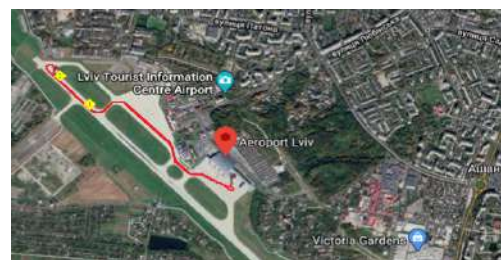


Fig. 4 – Lviv International Airport, Ukraine – Take-off Drive Cycle

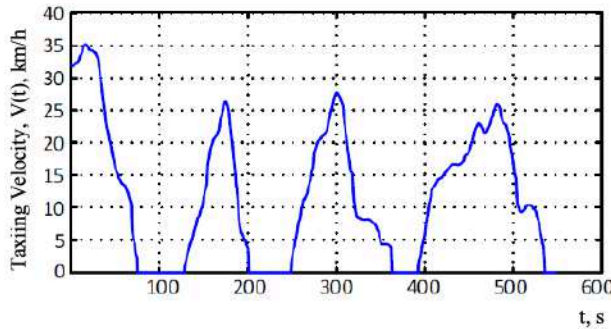


Fig. 5 – Dallas / Fort Worth Airport, USA – Landing Drive Cycle № 1

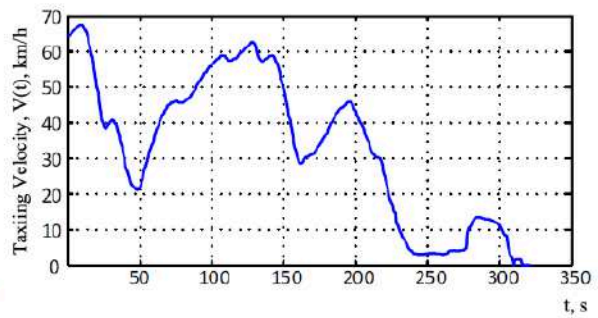


Fig. 6 – Boryspil Airport, Ukraine – Landing Drive Cycle

In fig. 5 and 6 two different landing cycles are shown. The taxiing cycle at Dallas Airport is an example of a cycle with frequent stops to reach a maximum taxiing speed of close to 30 km/h. The landing cycle at Boryspil airport, in contrast to the Dallas cycle, during the steering phase is a smooth profile without stops, reaching a high speed of up to 60 km/h. The only existing stop in the Boryspil landing profile is the place where the aircraft reaches its final position in front of the terminal (after 310 s).



Fig. 7 – Dallas / Fort Worth Airport, USA – Landing Drive Cycle № 1



Fig. 8 – Boryspil Airport, Ukraine – Landing Drive Cycle

Analysis of the results of graphs for these four application cycles shows that steering can perform different profiles depending on the airport infrastructure and ground traffic conditions. The presence of steering profiles allows to perform a detailed performance analysis. These results of analysis can be used to determine the performance requirements of the ESS.

Optimization control of electric drive in the general case includes two interrelated tasks: 1) implementation of optimal by certain criteria rules change of controllable variables and formation setting influences corresponding to these changes; 2) reproduction of controllable variables of the setting influences by the least error.

The first task concerns optimization by control mode, the second – optimization by transients. Improving the quality of electric drive control systems by known methods is hindered by a wide range of factors that change the parameters' value of the electromechanical system (EMS) during operation. Therefore, there is a need to create a control system that would prevent the impact on the plant of destabilizing factors and would be insensitive to change. The usage of fuzzy regulators can solve this issue. They provide the implementation of the specified dynamic regimes. Fuzzy control can perform the function of adjusting the action of a traditional regulator that will increase the accuracy of the signal by a given speed.

A simplified model of the PMSM speed control circuit is used for modeling of elastic electromechanical system. The current circuit must be used in the system. General structure of speed regulation is shown in fig. 9.

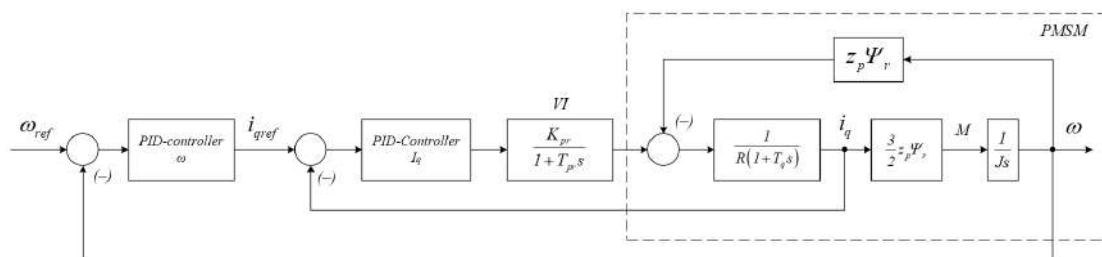


Fig. 9 – Simplified model of SDPM speed control: VI – voltage inverter

The simulation model in the Simlink environment is shown in Fig.10.

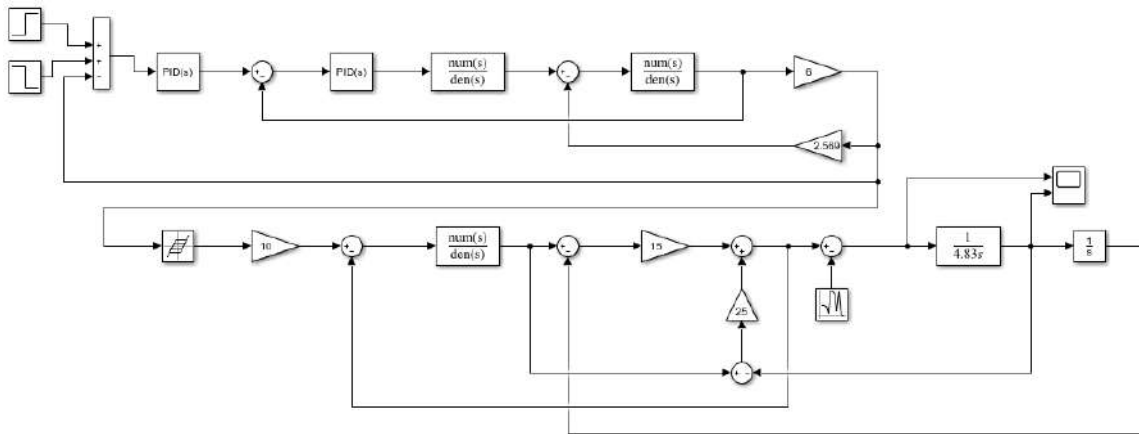


Fig.10 – Simulation model of a multi-mass EMS wheel of an aircraft chassis

Fig. 11 shows the transients in speed and torque. Speed adjustment is 14%. The transient process by the moment shows that the engine can go into generator mode under the influence of external influences. This is unacceptable during the operation of the system at the initial stage of aircraft movement.

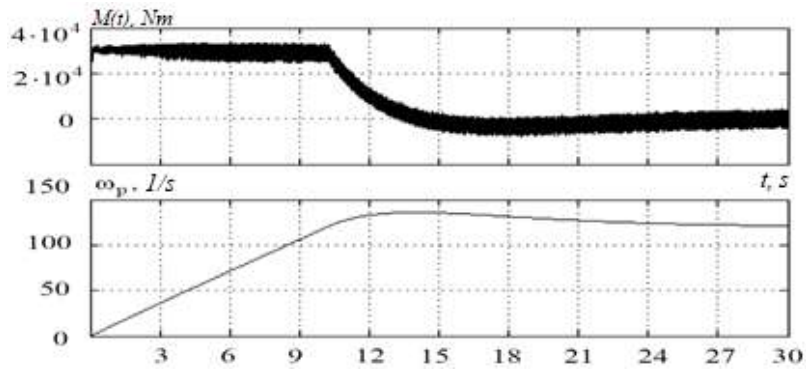


Figure 11 – Transients by speed and torque

It is necessary to consider that during the operation of the system its parameters may be changed. That is why an adaptive fuzzy controller (FC) with two input signals of the difference between the set and current wheel speeds should be used as the speed controller. The block diagram of the control system using the adaptive fuzzy controller (FC) [6] is shown in Fig. 12.

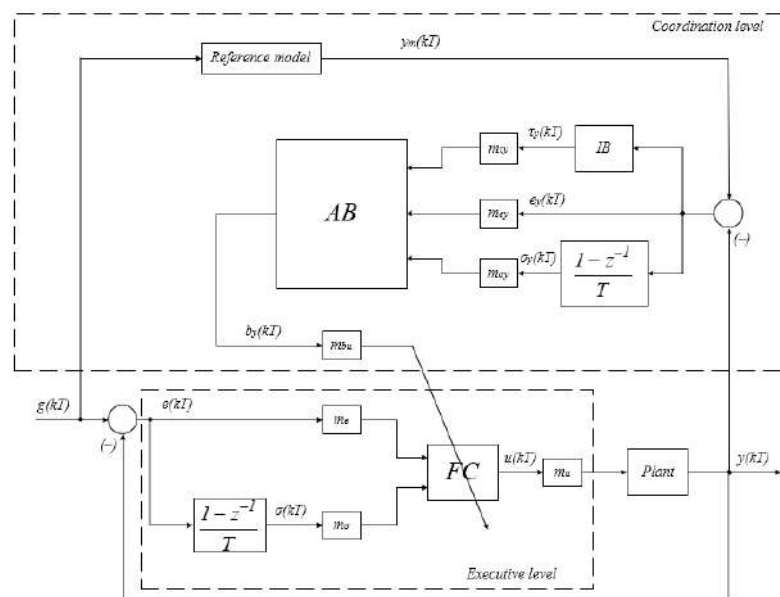


Figure 12 – The structure of the control system with adaptive FC: AB – adaptation block; IB – integration block

Adaptive FC combines coordination and executive control levels. The principle of operation is as follows. A significant change in the behavior of the plant in a given situation is characterized by the difference between the actual and desired state of the plant. At this moment, the fuzzy output system of the executive level produces a control signal. The implementation of it doesn't provide necessary indicators of quality control. In this case, the coordination level of adaptation block automatically sets the optimal settings for fuzzy executive level rules. Own fuzzy executive system is used in this case. The direct change of the rules of executive level is carried out by the rules base corrector. As usual, these rules are subject for linguistic correction, the activation of which in terms of linguistic assessment of control leads to inadequate control. Thus, at the coordination level there is a vague assessment of control and, if necessary, correction of the base of rules on the FC executive level. So, an intellectual assessment is carried out. It corrects the behavior of the control system, which is defined in the form of fuzzy rules at the executive level.

The structures of regulators of the coordination and executive levels are the simplest. In the general case, they have two fuzzy inputs – speed control error $e(kT)$ and its derivative (acceleration) $\sigma(kT)$ [6]. An error signal $e(kT)$ is generated on the output of the first adder. Then its derivative $\sigma(kT)$ is calculated. Both signals after scaling are fed to the input of FC. Seven membership functions with triangular shape are used to fassify "error" and "error derivative" and for phasing "output signal" – nine functions of belonging to the triangular shape. They are shown in Fig. 13.

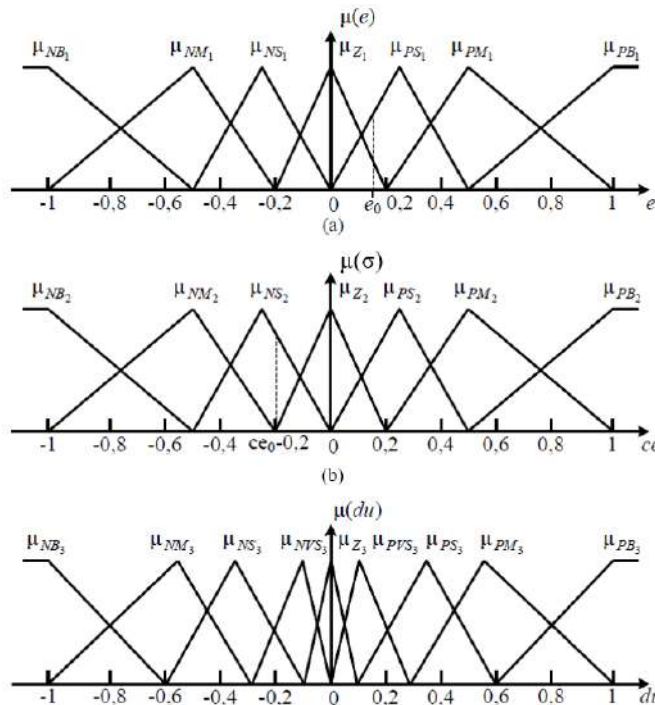


Figure 13 – Membership functions for the indistinct variables of the fuzzy control signal: (a) angular velocity error signal, (b) angular velocity error derivative signal

A fassification operation is performed when on the input of the FR error signals and its derivative occur. As a result, the active membership functions of the corresponding linguistic variables are determined. In this case, depending on the value of the input signal, from two to four active membership functions are determined. The rules database looks for rules that include a combination of active membership functions, i.e.:

$$\mu_r(e(kT), \sigma(kT)) = \min\{\mu_i(e(kT)), \mu_i(\sigma(kT))\} > \eta \quad (1)$$

where η – is the parameter that determines the "roughness" of the search operation.

In this case, the value of the offset of the membership functions for the output signal FC in advance is calculated in the AB. For active rules, the membership functions of the output signal FC are shifted. The coordinates of the centers $c_j(kT)$ of the membership functions of the output signal at time kT are calculated in accordance with the following expression:

$$c_j(kT) = c_j(kT - T) + \psi b_u(kT), \quad (2)$$

where $c_j(kT - T)$ – the centers of gravity of the membership functions of the active state on the previous cycle;

ψ – change value modifier.

Next, the standard Mamdani fuzzy inference algorithm continues to be executed. This completes the rule base (at the beginning of the algorithms, the rule base is empty) and the position of the membership function of the FC signal in the normal operation signal mode of the plant is determined.

Formation of the output signal of FC is carried out based on the rules given in Table 2.

Table 2 – Base of FC rules

$\sigma(kT) \backslash e(kT)$	NB_1	NM_1	NS_1	Z_1	PS_1	PM_1	PB_1
NB_2	NB_3	NB_3	NB_3	NM_3	NS_3	NVS_3	Z_3
NM_2	NB_3	NB_3	NM_3	NS_3	NVS_3	Z_3	PVS_3
NS_2	NB_3	NM_3	NS_3	NVS_3	Z_3	PVS_3	PS_3
Z_2	NM_3	NS_3	NVS_3	Z_3	PVS_3	PS_3	NM_3
PS_2	NS_3	NVS_3	Z_3	PVS_3	PS_3	NM_3	NB_3
PM_2	NVS_3	Z_3	PVS_3	PS_3	NM_3	NB_3	NB_3
PB_2	Z_3	PVS_3	PS_3	NM_3	NB_3	NB_3	NB_3

The block diagram shown in Fig. 9 acts as a reference model. The parameters of this model are known. This is due to the fact that the system has the desired appearance of transients.

In fig. 14 shows the transients by speed and torque. Speed overshoots are almost non-existent and adjustment time has decreased. The transition process by the torque shows that the engine no longer goes into generator mode. The adjustment time also decreased, but the fluctuations remained. This is due to the fact that the wheel is affected by the chassis from the side of the rack, on which there are damping devices. They affect the dynamics of the wheel at the time of move.

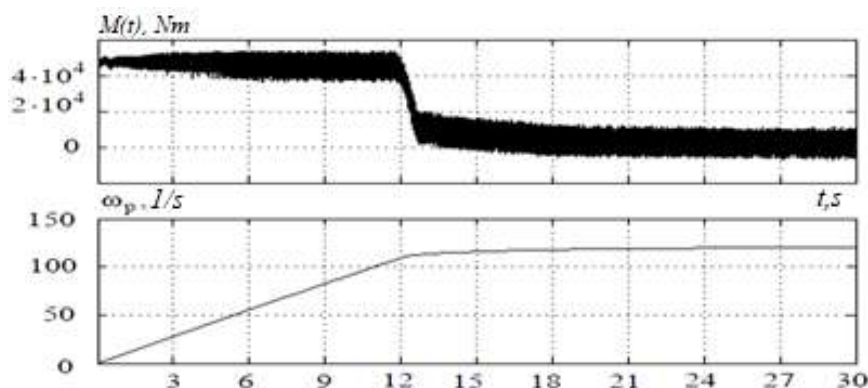


Fig. 14 – Transients by speed and torque

Conclusions:

1. Testing of the model of the traction electric drive on the basis of vector control of SDPM showed that such electric drive has excellent quality indicators in transient processes. This explains advantage of use it as an electric steering system.
2. The developed simulation model of the aircraft steering system has proven its effectiveness as a substitute for traditional methods of aircraft control.
3. Proposed adaptive fuzzy controller provides high quality control under various influences and variable EMS parameters. The robust properties of the control system allow to use the controller for objects with an undefined model. This is achieved due to the fact that the method of operation of the controller provides a simple and reasonable adjustment of its parameters.

REFERENCES

1. E. R. Bovshuk, “Robust control of a nonlinear system with parametric uncertainty” in *Science-intensive technologies*, vol. 12, no. 4, pp. 31-34, 2011.
2. F. O. Demchenko, “Optimization of parameters of the control system of synchronous motors with permanent magnets” in *Collection of scientific papers DonIzhT*, vol. 9, pp. 74-86, 2007.
3. A. B. Vinogradov, *Vector control of AC drives*. Ivanovo, Russia: GOUVPO “Ivanovo State Energy University”, 2008.
4. P. Fajri, R. Ahmadi and M. Ferdowsi, "Equivalent Vehicle Rotational Inertia Used for Electric Vehicle Test Bench Dynamic Studies," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada, Oct. 25-28, 2012, pp. 4115-4120, doi: 10.1109/IECON.2012.6389231.

5. A. Abdurrrhman and W. Wang "Torque of rotating device prior an airplane landing" in *International Journal of Engineering Research and General Science*, Feb.- Mar., 2014, vol. 2, issue 2, pp. 214-222. ISSN 2091-2730.

6. R. F. Pupkov et al., *Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control*, N. D. Yehupov, Ed., Moscow, Russia: MSTU im. N.E. Bauman Press., 2001.

УДК 62-523.2, 62-515, 629.7.062.3

Д. С. Матушкін, аспірант, **ORCID 0000-0003-4431-7862**

А. В. Босак, канд. техн. наук, доцент, **ORCID 0000-0003-0545-9980**

Л. Я. Кулаковський, канд. техн. наук, ст. викл., **ORCID 0000-0003-1273-6894**

В. Г. Дубовик, ст. викл., **ORCID 0000-0001-8884-8222**

С. Л. Прядко, ст. викл., **ORCID 0000-0003-1078-6812**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РУЛІННЯ ЛІТАКА З АДАПТИВНИМ НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Протягом останніх двох десятиліть продовжують домінувати ініціативи щодо енергооптимізації літаків. Комерційний авіаційний бізнес все частіше використовує системи екологічного контролю та електричне управління за допомогою шин змінного та постійного струму. Однією з тенденцій розвитку систем управління літаками є заміна гідравлічних та пневматичних систем на електричні. Аерокосмічна промисловість та авіакомпанії зацікавлені виконувати операції руління без використання головних двигунів. Цей спосіб експлуатації дозволяє економити паливо, зменшувати зношення гальм, виключає буксирування та досягає зменшення забруднення навколишнього середовища. Надалі необхідно реалізувати електричне рульове управління за допомогою тягового приводу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами). Це дослідження представляє високоефективну систему електричного рульового управління як сучасне рішення для поліпшення наземних операцій сучасних літаків, що працюють від основних двигунів. Система була досліджена з використанням рульових профілів зльоту та посадки. Результати моделювання динамічних процесів електромеханічної системи, що містить пружні ланки, в умовах параметричних збурень підтвердили стійку стабілізацію показників якості динамічного управління на основі законів нечіткої логіки.

Ключові слова: система керування, тяговий електропривод, руління літаком, нечіткий регулятор.

Список використаної літератури

1. Бовшук Е.Р. Робастное управление нелинейной системой с параметрической неопределенностью [Текст] / Е. Р. Бовшук // Научные технологии. - 2011. - Т. 12, № 4. - С. 31-34.
2. Демченко Ф. О. Оптимизация параметров системы управления синхронными двигателями с постоянными магнитами / Ф. О. Демченко. // ДонІЗТ. - 2007. - № 9. - С. 74-86.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. - Иваново, 2008. - 298 с. ISBN.
4. P. Fajri, R. Ahmadi and M. Ferdowsi, "Equivalent Vehicle Rotational Inertia Used for Electric Vehicle Test Bench Dynamic Studies," in IECON 2012 - 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, QC, Canada, Oct. 25-28, 2012, pp. 4115-4120.
5. A. Abdurrrhman and W. Wang "Torque of rotating device prior an airplane landing" in *International Journal of Engineering Research and General Science*, Feb.- Mar., 2014, vol. 2, issue 2, pp. 214-222. ISSN 2091-2730.
6. Пупков К.А. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления [Текст]: учеб. / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов, А.И. Гаврилов и др.; Под ред. Н.Д. Егупова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. - 743 с.

Надійшла 29.05.2020

Received 29.05.2020

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 536.24:66.045.12

М.М. Вознюк, мол. наук. співроб., ORCID 0000-0002-2452-2255
С.М. Письменний, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6403-6596
О.М. Терех, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., ORCID 0000-0002-1320-8594
В.Ю. Ліщишин, аспірант, ORCID 0000-0003-4327-3319
Д.В. Конько, магістр 6 курсу, ORCID 0000-0001-6469-3529
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПЛОСКООВАЛЬНИХ ТРУБ З НЕПОВНИМ ОРЕБРЕННЯМ В УМОВАХ ПРИРОДНОЇ ТЯГИ

Розглянута ефективність перевodu апаратів повітряного охолодження у режим вільної конвекції. Встановлена доцільність встановлення витяжної башти над теплообмінною поверхнею апарату повітряного охолодження та його переведення у режим природної тяги. Відзначена можливість застосування плоскоовальних труб з неповним оребрнням у конструкціях апаратів повітряного охолодження з природною тягою. Проведені варіантні розрахунки апарату повітряного охолодження на базі найпоширеніших на ринку України оребrenних труб, в якому необхідна для забезпечення теплової потужності кількість повітря забезпечується лише за рахунок витяжної башти. Співставлення результатів розрахунків показують, що найкращі техніко-економічні показники має варіант апарату повітряного охолодження на базі плоскоовальних труб з неповним оребрнням. Сума капітальних витрат на виготовлення апарату повітряного охолодження на базі плоскоовальних труб з неповним оребрнням на 47% менша за варіант апарату на базі біметалевих труб з накатаним спіральним оребрнням та в 2 рази менша за варіант виконання апарату повітряного охолодження на базі труб з приварним спіральнo-стрічковим оребрнням або овальних труб з овальним оребрнням.

Ключові слова: енергоефективність, теплообмін, оребrena труба, природна тяга, апарат повітряного охолодження

Вступ

При будівництві нових та при переоснащенні існуючих енергетичних, нафтохімічних, газотранспортних, виробничих та інших підприємств все більшого розповсюдження набувають апарати повітряного охолодження (АПО) різноманітних рідин (води, природного газу, гасу, етилен- та пропілен-гліколів, мастила та інш.). В таких теплообмінних апаратах охолодження рідини здійснюється за допомогою атмосферного повітря, необхідна витрата якого через теплообмінну поверхню АПО здійснюється за допомогою встановлюваних витяжних або нагнітаючих вентиляторів [1]. При цьому, для забезпечення необхідної витрати повітря через теплообмінну поверхню АПО потужністю 1 МВт, необхідна встановлювана потужність двигунів вентиляторів становить близько 18 кВт. Річна витрата електроенергії на привід вентиляторів становить до 100 МВт·год, що відповідає близько 224 тис. грн. витрат підприємства на рік.

Для зменшення кількості витрат електроенергії авторами [2–4] було запропоновано виконувати протягом певної пори року перевід АПО у безвентиляторний режим роботи. При цьому відвід теплового потоку від робочого тіла АПО виконується у режимі природної конвекції. За даними джерел [2–4], загальна економія електроенергії при цьому становить до 37 % від загального річного споживання. Крім того, у роботі [5] запропоновано для розширення можливого річного діапазону роботи АПО у безвентиляторному режимі проводити встановлення додаткової витяжної башти. Таке рішення переводить режим роботи АПО у режим природної тяги та дозволяє знизити річну витрату електроенергії на привід вентиляторів до 55%.

© М.М. Вознюк, С.М. Письменний, О.М. Терех, В.Ю. Ліщишин, Д.В. Конько, 2020

Дослідженню теплообмінних апаратів з витяжною баштою присвячені праці [6–8]. У даних роботах розглядається вплив розташування теплообмінної поверхні, висоти та розташування витяжної башти на ефективність роботи теплообмінного пристрою.

Варто відмітити, що головним елементом АПО, від якого в цілому залежить ефективність його роботи є поверхня теплообміну. Як правило, поверхня теплообміну виконується у вигляді пакету гладких, або частіше, оребрених труб. Найпоширенішими оребреними трубами, які використовуються в поверхнях теплообміну АПО на сьогоднішній день є ребристі труби круглого профілю. У роботах [9–12] показані значні переваги використання розроблених у КПІ ім. Ігоря Сікорського плоскоовальних труб з неповним оребренням у конструкціях АПО. До цих переваг слід віднести високу інтенсивність конвективного теплообміну, низький аеродинамічний опір, простоту та технологічність виготовлення таких труб та відсутність контактної термічної опору між трубою та оребренням.

Мета та завдання дослідження

У роботах [13–16] розглядається теплообмін та аеродинамічний опір плоскоовальних труб в умовах вільної конвекції та природної тяги. Проте у даних працях та доступній літературі відсутні дані щодо співставлення ефективності роботи плоскоовальних труб з неповним оребренням у порівнянні з іншими розповсюдженими ребристими трубами в вищенаведених умовах.

Метою роботи є проведення аналізу доцільності використання плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги. Даний аналіз найбільш доцільно виконати шляхом порівняння ефективності різних типів оребрених поверхонь шляхом співставлення характеристик варіантів теплообмінного апарату, виконаного на базі найбільш розповсюджених на ринку України оребрених труб. У якості такого теплообмінного апарату було обрано апарат повітряного охолодження (рис. 1, б), у якому забезпечення проходу необхідної кількості повітря через поверхню теплообміну (поз. 1 рис.1) виконується за допомогою витяжної башти (поз. 5 рис.1). Завдяки такому рішенню з конструкції АПО виключаються осьові вентилятори (поз. 3 рис.1) та їх дифузори (поз. 4 рис.1) та повністю виключаються витрати електроенергії на привід вентиляторів.

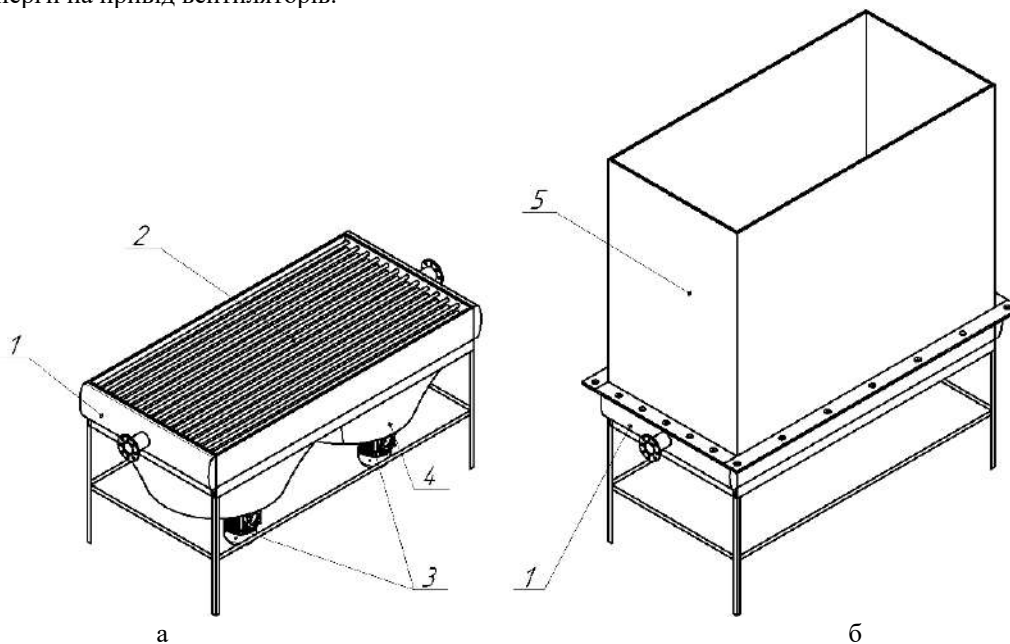


Рис. 1. Загальний вигляд апарату повітряного охолодження:
а – з встановленими вентиляторами; б – з встановленою витяжною баштою
1 – теплообмінна секція; 2 – оребрена труба; 3 – осьовий вентилятор з двигуном;
4 – дифузор; 5 – витяжна башта

Для досягнення мети дослідження були поставлені наступні задачі:

- Виконати варіантні розрахунки апарату повітряного охолодження з природною тягою на базі найбільш поширених оребрених труб;
- Провести аналіз розрахунків та оцінити техніко-економічну ефективність використання плоскоовальних труб з неповним оребренням у якості теплообмінної поверхні АПО з природною тягою.

Матеріал і результати досліджень

Для виконання варіантних розрахунків АПО з природною тягою були обрані чотири найбільш поширені типи оребрених труб, представлені на ринку України – плоскоовальні труби з неповним

оробренням, труби з приварним спірально-стрічковим оробренням, біметалеві труби з накатаним спіральним оробренням, та овальні труби з неповним оробренням, які мають приблизно однакові значення периметрів їх внутрішніх перетинів. Загальний вигляд даних труб представлений на рис. 2. Геометричні характеристики даних оробрених труб були обрані у відповідності до їх наявності на ринку та представлені у таблиці 1. Слід зазначити, що у всіх згаданих варіантах труби розташовувались у шаховому компонуванні (рис.3).

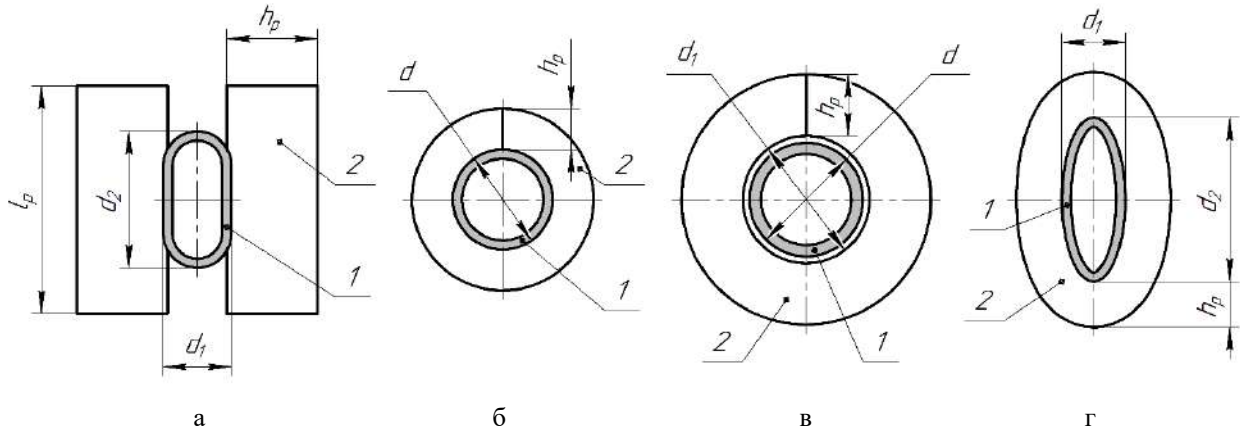


Рис. 2. Типи оробрених труб, що порівнюються:

- а – плоскоовальна труба з неповним оробренням; б – труба з приварним спірально-стрічковим оробренням;
в – біметалева труба з накатаним спіральним оробренням; г – овальна труба з неповним оробренням
1 – труба що несе оробрення; 2 – оробрення

Розрахунки АПО з витяжною баштою на базі плоскоовальних труб з неповним оробренням проводилось за методиками та розрахунковими залежностями, наведеними у [15-17], на базі труб з приварним спірально-стрічковим оробренням та біметалевих труб з накатаним спіральним оробренням – за методиками та розрахунковими залежностями [17-19], на базі овальних труб з неповним оробренням – за методиками та розрахунковими залежностями [17, 19, 20].

Таблиця 1 – Геометричні характеристики порівнюваних типів оробрених поверхонь

№ з/п	Найменування величини	Позначення	Значення			
			Плоскоовальні труби з неповним оробренням	Труби з приварним спірально-стрічковим оробренням	Біметалеві труби з накатаним спіральним оробренням	Овальні труби з овальним оробренням
1	Відношення діаметрів труби, що несе оробрення	d_2/d_1	2,0	–	–	2,6
2	Діаметр труби, що несе оробрення	d , м	–	22,0	28,0	–
3	Висота ребра	h_p , м	20,0	9,0	13,5	10,0
4	Довжина ребра	l_p , м	50,0	–	–	–
5	Товщина ребра	δ_p , мм	0,8	0,8	0,5	0,5
6	Крок ребер	t , мм	3,5	3,2	3,0	3,0
7	Повна площа поверхні одного погонного метру	H_1 , м ² /м.п.	1,238	0,631	1,275	0,841
8	Коефіцієнт оробрення	ψ	16,0	9,1	14,5	10,2
9	Матеріал труби, що несе оробрення	–	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь
10	Матеріал оробрення	–	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь	Алюміній	Вуглецева сталь

У якості теплообмінного апарату для порівняння було обрано апарат повітряного охолодження з природною тягою потужністю 1 МВт. Температура рідини на вході складала 80 °С, на виході – 65°С. При розрахунках приймалося, що забезпечення необхідної витрати повітря (25 м³/с) для відведення заданої потужності у всьому діапазоні навантажень здійснюється лише за допомогою витяжної башти.

Співставлення виконувалося по чотирьох найбільш важливих характеристиках – загальній довжині оробрених труб L_{mp} , тепловій потужності, що відводиться від одного погонного метру труби q ,

аеродинамічному опору теплообмінного апарату ΔH , та пов'язаною з ним висотою витяжної башти H_b . У якості узагальнюючого критерію, який показує економічну доцільність застосування того чи іншого типу труб, було обрано суму капітальних витрат на виготовлення теплообмінного апарату $\Sigma_{\text{кап}}$.

Результати даного співставлення представлені у табл. 2 та на рис. 4-6.

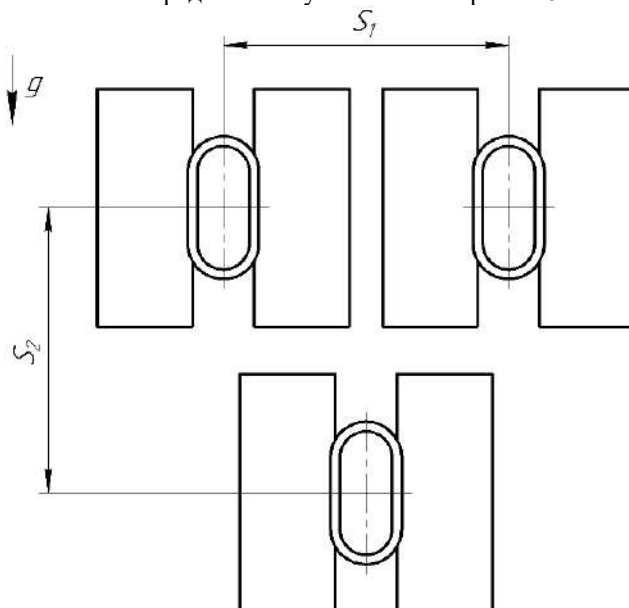


Рис. 3. Геометричні характеристики шахового пакету оребрених труб

Таблиця 2 – Співставлення техніко-економічних характеристик апарату повітряного охолодження з природною тягою на базі різних типів оребрених поверхонь

№ з/п	Найменування величини	Позначення	Значення			
			Плоскоовальні труби з неповним оребренням	Труби з приварним спіральним стрічковим оребренням	Біметалеві труби з накатаним спіральним оребренням	Овальні труби з овальним оребренням
1	Поперечний крок труб шахового пакету	S_1 , мм	60	45	56	48
2	Поздовжній крок труб шахового пакету	S_2 , мм	60	50	60	46
3	Загальна довжина оребрених труб	$L_{\text{пр}}$, м	912	1 632	1 080	1 408
4	Теплова потужність, що відводиться від одного погонного метру труби	q_l , кВт/м.п.	1,10	0,61	0,93	0,71
5	Аеродинамічний опір апарату повітряного охолодження	ΔH , Па	20,2	29,5	27,6	18,5
6	Необхідна висота витяжної башти	H_b , м	16	23,4	21,8	14,6
7	Сума капітальних витрат на виготовлення теплообмінного апарату	$\Sigma_{\text{кап}}$, грн	1 072 000	2 248 000	1 582 000	1 926 000

Як слідує з табл. 2 та рис. 5, найменші довжини труб та, відповідно, найбільші теплові потужності, що відводяться від одного погонного метру труби спостерігаються для плоскоовальних труб з неповним оребренням та для біметалевих труб з накатаним спіральним оребренням. Ці величини вагомою мірою визначають трудомісткість виготовлення теплообмінного апарату та його вартість. Проте для випадку розгляду АПО з витяжною баштою є вагомим аеродинамічний опір теплообмінного апарату та відповідна висота башти. З табл. 2 та рис. 5 випливає, що найменші аеродинамічні опори та, відповідно, висоти

витажних башт мають АПО на базі овальних труб з овальним оребренням та плоскоовальних труб з неповним оребренням.

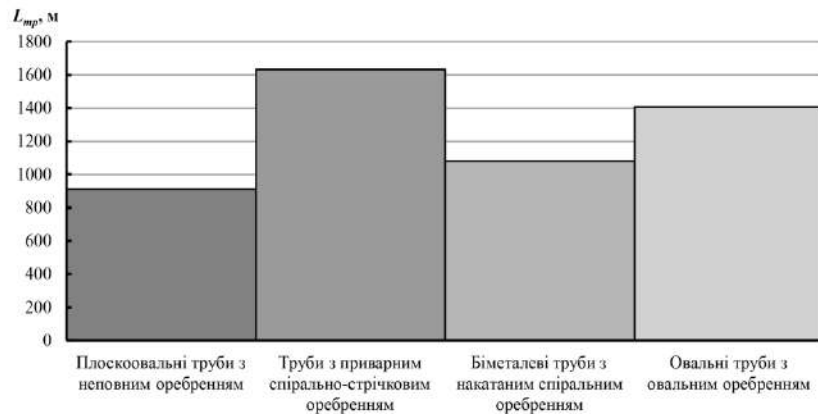


Рис. 4 – Співставлення довжин труб L_{mp} апаратів повітряного охолодження з природною тягою на базі різних типів оребрених труб

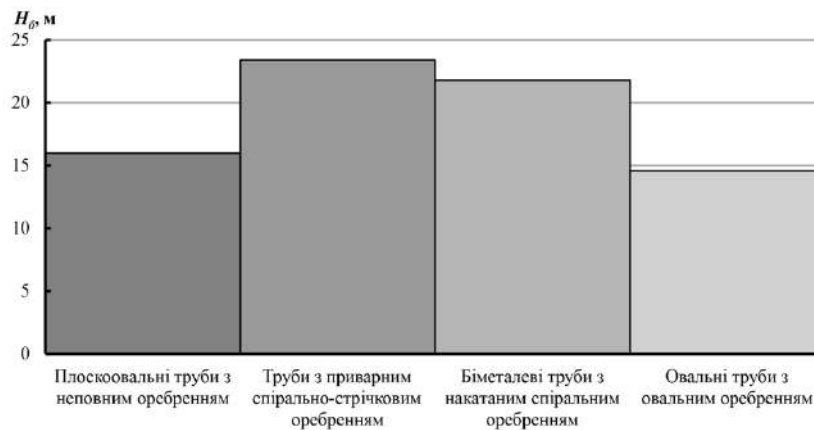


Рис. 5 – Співставлення висот башт H_b апаратів повітряного охолодження з природною тягою на базі різних типів оребрених труб

Загальною характеристикою, за якою можна визначити найбільш ефективну поверхню теплообміну є загальна сума капітальних витрат на виготовлення теплообмінного апарату $\Sigma_{кап}$. Дана величина враховує як і загальну довжину труб, кількість необхідних зварних з'єднань та кількість супутніх матеріалів, так і необхідну висоту витажної башти. Слід зазначити, що експлуатаційні витрати та площа, яку займає АПО для всіх чотирьох вищезгаданих варіантів є практично ідентичною. Порівняння загальних сум капітальних витрат на виготовлення теплообмінного апарату $\Sigma_{кап}$ зображені на рис. 6.

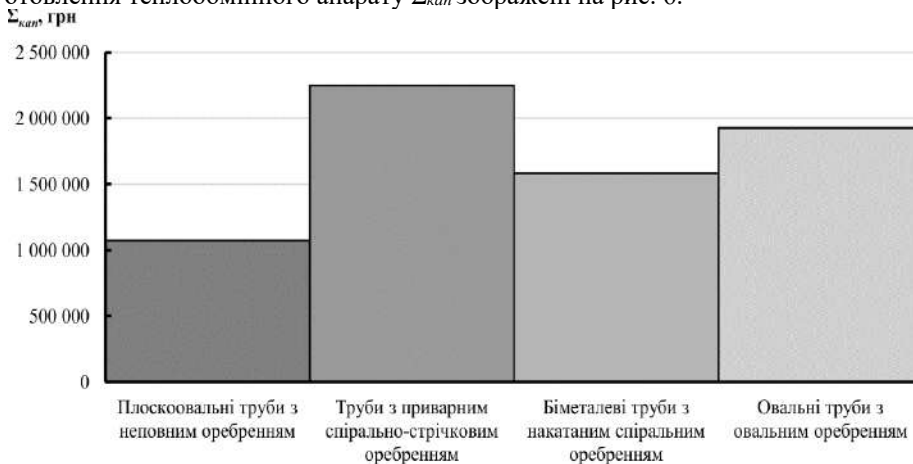


Рис. 6 – Співставлення сум капітальних витрат на виготовлення апаратів повітряного охолодження з природною тягою на базі різних типів оребрених труб

Слід відзначити, що $\Sigma_{\text{кап}}$ відображає всі необхідні витрати на виготовлення теплообмінного апарату з точки зору заводу-виготовлювача – вартість придбання відповідних оребрених труб, супутніх металоконструкцій та комплектуючих, вартість трудових витрат та вартість виготовлення і встановлення витяжної башти.

Як впливає з рис. 6, найбільш вигідним варіантом виготовлення АПО з природною тягою за сумою капітальних витрат на виготовлення є варіант його виконання на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням. Цей варіант на 47% дешевший за наступним за вартістю варіантом виконання АПО – на базі біметалевих труб з накатаним спіральним оребренням та в 2 рази дешевший за варіант виконання АПО на базі труб з приварним спіральнo-стрічковим оребренням або овальних труб з овальним оребренням.

Висновки

За результатами проведених варіантних розрахунків апарату повітряного охолодження з природною тягою було визначено, що варіант АПО на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням має найменшу довжину оребрених труб, найбільшу теплову потужність, що відводиться від одного погонного метру труби та прийнятну висоту витяжної башти. Крім того, варіант АПО на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням має найменшу суму капітальних витрат на його виготовлення. Це дозволяє підтвердити техніко-економічну привабливість плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги. Крім того, варто відзначити, що запропоноване рішення проектування АПО з витяжною баштою дозволить підприємству економити до 100 МВт·год електричної енергії на 1 МВт встановленої потужності АПО щорічно, підвищити загальну ефективність роботи підприємства та знизити викиди парникових газів в атмосферу.

Враховуючи дане дослідження та наведені у [9-12] переваги таких труб при їх роботі у режимі вимушеної конвекції, доцільним є застосування плоскоовальних труб з неповним оребренням у конструкціях апаратів повітряного охолодження при будь-якому режимі їх роботи. Опанування технології серійного масового виготовлення таких труб дозволить налагодити виробництво вітчизняних сучасних ефективних апаратів повітряного охолодження, та інших рекуперативних пристроїв типу «газ-рідина» та відмовитись від імпорту коштовного зарубіжного теплообмінного обладнання.

Список використаної літератури

1. Кунтыш В.Б. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения (Справочник) / А.П. Бессонный, Г.А. Дрейцер, В.Б. Кунтыш, и др.; Под общ. ред. В.Б. Кунтыша., А.Н. Бессонного. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.
2. Кунтыш В.Б. Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободно-конвективного теплообмена / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. В. Самородов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 12. – С. 3-6.
3. Камалетдинов И.М. Расчет свободноконвективного теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) газа с учетом влияния ветра на их работу // Изв. Вузов. Нефть и газ. – 2001. – №5. С. 71-74
4. Васильев Ю.Н. Эксплуатация систем воздушно-водяного охлаждения в режиме естественной конвекции / Ю.Н. Васильев, В.С. Золотаревский, Г.А. Марголин, Н.П. Крюков // Газовая промышленность. 1972. - №6. - С. 23-25.
5. Письменный С.М., Терех О.М., Руденко О.І., Ніщик О.П., Вознюк М.М. Спосіб енергозбереження в апараті повітряного охолодження / Патент на корисну модель UA №110702. 25.10.2016. Бюл. №20.
6. Сухоцкий А.Б. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком / А.Б. Сухоцкий, Г.С. Маршалова // Инженерно-Физический Журнал. – 2019. Т.92 №3. – С. 619-625
7. Мильман О.О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой / О.О. Мильман, Б.А. Алешин // Теплоэнергетика. –2005. № 5. – С. 16-19.
8. K. Tanimizu. Natural draft dry cooling tower modelling / K. Tanimizu, K. Hooman // International Journal of Heat and Mass Transfer – 2013/ - Vol. 49 – pp. 155-161.
9. Pis'mennyi E. N. Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes. Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 106. P. 1075 – 1087.
10. Письменный Е.Н. Новые эффективные развитые поверхности теплообмена для решения задач энерго-и ресурсосбережения // Пром. теплотехника. – 2007. – Т.29, №5. – С. 7-16.
11. Письменный Е. Н. Оптимизация оребрения новой теплообменной поверхности на основе плоскоовальных труб / Е. Н. Письменный, П. И. Багрий, А.М. Терех, А.В. Семеняко // Инженерно-физический журнал – 2013. Т.86 №5. – С. 1002-1007.

12. Багрий П.И. Сравнение тепловой эффективности шахматных пучков поперечно-оребранных труб различного профиля / П.И. Багрий, А.М. Терех, В.А. Рогачев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №6/5 (30). – С. 51-56.

13. Вознюк, М. М. Теплообмін плоскоовальних труб в умовах вільної конвекції і природної тяги [Текст] / М. М. Вознюк, О. М. Терех, О. І. Руденко, С. А. Рева, О. В. Баранюк // Науковий журнал "ScienceRise". – 2016. – №2/2(19). – С. 10-15.

14. Вознюк, М. М. Теплообмін пакетів плоскоовальних оребрених труб в умовах вільної конвекції і природної тяги / М. М. Вознюк, О. М. Терех, В.А. Рогачов, О. В. Баранюк // Науковий журнал "Енергетика економіка, технології, екологія". – 2016. – №2/(44). – С. 46-53.

15. Вознюк, М. М. Теплообмін поперечно-омиваних шахових пучків плоскоовальних оребрених труб при малих числах Рейнольдса / М. М. Вознюк, В.А. Рогачов, О. М. Терех, О. В. Баранюк // Науковий журнал "ScienceRise". – 2015. – №5/2(10). – С. 36-40.

16. Вознюк, М. М. Аеродинамічний опір шахових пакетів плоскоовальних оребрених труб при малих числах Рейнольдса / М. М. Вознюк, І. С. Башкір, О. М. Терех, В.А. Рогачов, О. І. Руденко // Науковий журнал "ScienceRise". – 2015. – №6/2(11). – С. 90-94.

17. Письменный Е.Н. Расчет конвективных поперечно-оребранных поверхностей нагрева. Сборник расчетов. К.: Альтерпрес, 2003. – 184 с.

18. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-оребранных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. – М.: Минэнергомаш – 1988. – 30 с.

19. Кунтыш В. Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. – С-Пб. : Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд., 1992. — 280 с

20. Юдин В. Ф. Теплообмен пучков оребренных труб овального профиля / В. Ф. Юдин, Е. Д. Федорович // Теплообмен. – ММФ-92. – Конвективный теплообмен. Т. 1, ч. 1. – Минск :АНК ИТМО АНБ, 1992. – С. 58–61.

M. Vozniuk, JRF, ORCID 0000-0002-2452-2255

E. Pis'mennyi, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0001-6403-6596

A. Terekh, Cand. Sc. (Eng.), SRF, ORCID 0000-0002-1320-8594

V. Lishchyshyn, PhD student, ORCID 0000-0003-4327-3319

D. Konko, Master's student, ORCID 0000-0001-6469-3529

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ANALYSIS OF ECONOMIC EFFICIENCY OF USING FLAT-OVAL TUBES WITH INCOMPLETE FINNING IN CONDITIONS OF NATURAL DRAFT

The efficiency of air coolers, working in free convection mode is considered. The expediency of installing an exhaust tower over the heat exchange surface of the air cooler and its transfer to the mode of natural draft has been established. The possibility of using flat-oval tubes with incomplete finning in the designs of air-cooled devices with natural draft is noted. Variant calculations of the aircooling device on the basis of the most widespread in the market of Ukraine finned tubes in which the quantity of air necessary for maintenance of thermal power is provided only by an exhaust tower are carried out. Comparisons of the results of calculations show that the best technical and economic indicators have a variant of the air cooler based on flat-oval tubes with incomplete finning. The amount of capital costs for the manufacture of air cooler based on flat-oval tubes with incomplete finning is 47% less than the heat exchanger based on bimetallic tubes with rolled spiral finning and 2 times cheaper than the option of aircooler based on tubes with welded spiral fins or oval pipes with oval finning.

Keywords: energy efficiency, heat transfer, finned tube, natural draft, air cooler.

REFERENCES

1. Kuntyshev, V. B. Fundamentals of calculation and design of air coolers (Handbook) / A.N. Bessonnyi, G.A. Dreyser, V.B. Kuntyshev, and others; Under the general editorship of V.B. Kuntyshev., A.N. Bessonnyi. Saint-Petersburg.: Nedra, 1996. 512 p. (Rus.)

2. Kuntyshev, V. B. Engineering method of thermal calculation of an air cooler in the free convective heat transfer mode / V. B. Kuntyshev, A. B. Suhockiy, A. V. Samorodov // Chemical and oil and gas engineering. 2013. № 12. P. 3-6. (Rus.)

3. Kamaletdinov I.M. Calculation of free convective heat transfer in air coolers (AC) taking into account the effect of wind on their operation // Izvestiya Vuzov. Neft I gaz. 2001. №5. P. 71-74. (Rus.)

4. Vasilyev U.N. Operation of air-water cooling systems in natural convection mode / U.N. Vasilyev, V.S. Zolotarevskiy, G.A. Margolin, N.P. Kriukov // *Gazovaya Promyshlennost*. 1972. №6. pp. 23-25. (Rus.)
5. Pis'mennyi, E. N, Terekh A.M., Rudenko A.I., Nishcik A. P., Vozniuk M.M. The method of energy saving in the air cooling apparatus / Utility model patent UA №110702. 25.10.2016. Bul. №20. (Ukr.)
6. Suhockiy A.B. Features of the gravitational flow of heated air in the exhaust shaft over a multi-row finned bundle / A.B. Suhockiy, G.S. Marshalova // *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*. 2019. Vol.92 №3. pp. 619-625 (Rus.)
7. Milman O.O., Experimental study of heat transfer during natural air circulation in a model of an air condenser with an exhaust shaft / O.O. Milman, B.A. Alyoshyn // *Heat power engineering*. 2005. № 5. pp. 16-19. (Rus.)
8. K. Tanimizu. Natural draft dry cooling tower modelling / K. Tanimizu, K. Hooman // *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2013. Vol. 49 pp. 155-161.
9. Pis'mennyi E. N. Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 106. pp. 1075 – 1087.
10. Pis'mennyi, E. N. New efficient heat transfer surfaces for solving problems of energy and resource saving // *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2007. №5. pp. 7-16. (Rus.)
11. Pis'mennyi, E. N. Optimization of finning of new heat-exchange surface / E. N. Pis'mennyi, P.I. Bagriy, A. M. Terekh, A. V. Semenyako // *Journal of Engineering Physics*. 2013. Vol.86 №5. – pp. 1002-1007.
12. Bagriy P.I. Comparison of thermal efficiency of staggered bundles of cross-finned tubes of various profiles / P.I. Bagriy, A.M. Terekh, V.A. Rogachev // *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. – 2007. – №6/5 (30). – pp. 51-56. (Rus.)
13. Voznyuk, M. M. Heat transfer of flat-oval tubes with incomplete fining under conditions of free convection and natural draft / M. M. Voznyuk, A. M. Terekh, A. I. Rudenko, S. A. Reva, A. V. Baranyuk // *Scientific journal "ScienceRise"*. 2016. №2 / 2 (19). pp. 10-15. (Ukr.)
14. Voznyuk, M. M. Heat exchange of packages of flat-oval finned tubes in the conditions of free convection and natural draft / M. M. Voznyuk, A. M. Terekh, V.A. Rogachev, A. V. Baraniuk // *Scientific magazine "Energy: Economics, Technology, Ecology"*. 2016. №2/(44). – pp. 46-53. (Ukr.)
15. Voznyuk, M. M. Heat transfer of staggered bundles of flat-oval finned tubes at small Reynolds numbers / M. M. Voznyuk, V.A. Rogachev, A. M. Terekh, A. V. Baraniuk // *Scientific journal "ScienceRise"*. 2015. №5/2(10). pp. 36-40. (Ukr.)
16. Voznyuk, M. M. Aerodynamic drag of staggered bundles of flat-oval finned tubes at small Reynolds numbers / M. M. Voznyuk, I. C. Башкір, A. M. Terekh, V.A. Rogachev, O. I. Rudenko // *Scientific journal "ScienceRise"*. 2015. №6/2(11). pp. 90-94. (Ukr.)
17. Pis'mennyi, E. N. Calculation of convective transversely-finned heating surfaces. Collection of calculations. Kyiv: Alterpres. 2003. 184 p. (Rus.)
18. Calculation and recommendations for the design of transversely-finned convective heating surfaces of stationary boilers. – Moscow.: Minenergomash. 1988. 30p. (Rus.)
19. Kuntyshev V. B. Thermal and aerodynamic calculations for air-cooled finned heat exchangers / V. B. Kuntyshev, N. M. Kuznetsov. – Saint-Petersburg. : Energoatomizdat. Saint-Petersburg dep., 1992. 280 p (Rus.)
20. Udin V. F. Heat transfer of oval finned tube bundles / V. F. Udin, E. D. Fedorovich // *Heat and mass transfer*. – MMF-92. – Convective heat and mass transfer. Vol. 1, p. 1. Minsk : ANK ITMO ANB. 1992. pp. 58–61. (Rus.)

Надійшла 27.05.2020
Received 27.05.2020

Трофімчук В.І., начальник відділу енергоефективності, ORCID 0000-0002-2102-4605
ТОВ «Оператор ГТС України»
Савельєв В.Г., менеджер зі стратегії, магістр комп'ютерних систем
Групи "1+1 медіа"

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОЄКТІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Розглянуто три методики для розрахунку економічного ефекту, на прикладі впровадження інвестиційного проєкту по відбору тепла із лінії автоматичного повітряного охолодження масла під час роботи компресорної станції по транспортуванню природного газу. Для можливості прийняття рішення щодо ефективності інвестицій по проєкту, проаналізовано чинники, які вплинуть на економічний ефект при реалізації проєкту. Представлено діючу в газотранспортній системі методика по розрахунку економічного ефекту. Дана методика є статичною відносно оцінки руху грошових коштів та не враховує, що вартість грошей з часом змінюється. Ефективність інвестиційного проєкту розраховано за іншою методикою, яка згідно з міжнародними стандартами бізнес-планування, визначає основні показники економічної ефективності інвестиційних проєктів. Недоліками приведених методик є те, що вони не враховують факторів (ризиків), які можуть виникнути під час експлуатації проєкту енергоефективності та будуть впливати на його ефективність. Для оцінки ризиків та можливості аналізування їх впливу на показники ефективності інвестиційного проєкту було вибрано метод імітаційного моделювання Монте-Карло. Визначено основні ризики, які можуть впливати на показники економічної ефективності інвестиційного проєкту. Застосування методу Монте-Карло дозволило проаналізувати всі можливі наслідки рішень в ході реалізації проєкту і оцінити вплив ризиків на показники ефективності проєкту, що забезпечило більш високу ефективність прийняття рішень в умовах невизначеності. Побудовано діаграму Торнадо, яка показала, що найбільш впливовими ризик-факторами є ціна на газ та напруження в опалювальний період. Діаграма Торнадо дала можливість кількісно оцінити вплив ризик-факторів на показники ефективності проєкту.

Ключові слова: економічний ефект; енергоефективність; метод Монте-Карло; ризик; інвестиційний проєкт; газотранспортна система.

Вступ.

Газотранспортна система (ГТС) України є однією з найбільших і найпотужніших у Європі. Діяльність трубопровідного транспорту із транспортування природного газу входить в п'ятірку найбільш енергоємних виробництв в Україні. ГТС України споживає близько 2% від всього споживання енергоресурсів України. [1]

Починаючи із 2020 року у зв'язку із будівництвом газопроводів в обхід території України таких як «Північний потік» та «Південний потік» суттєво зменшиться кількість транспортованого газу. Зменшення товаро-транспортної роботи приведе до зменшення рентабельності підприємства, а при недостатньому завантаженні до його збитковості. Тому на сьогодні як ніколи стає актуальним питання пошук шляхів підвищення енергоефективності підприємства.

Як відомо найбільший прибуток приносять проєкти з високим рівнем ризику, а недостатність знань та вмінь по ідентифікації та оцінці ризиків в подібних проєктах, стають на заваді їх реалізації. Як правило, для вирішення подібних проблем топ-менеджмент вдається до традиційних методів керування, які переважно базуються на особистому досвіді та суб'єктивних припущеннях, коли при прийнятті рішень не враховується весь спектр загроз та можливостей.

На транспортування природного газу здійснюється магістральними газопроводами за допомогою компресорних станцій КС, які розміщені більш менш рівномірно через кожні 100 км. В ГТС України використовуються газоперекачуючі агрегати (ГПА) потужністю від 6 да 25 МВт, максимальна потужність працюючої КС 50 МВт. Під час роботи ГПА перетворює енергію паливного газу на роботу відцентрованого нагнітача. ККД ГПА становить 25-33%, тобто корисна робота становить у середньому менше 30% інші 70% енергії втрачаються. Тому реалізація проєкту по використанню надлишкової енергії ГПА має значний економічний ефект та є актуальною.

© В.І.Трофімчук, В.Г. Савельєв, 2020

Формування цілей статті.

Авторами було сформульовано наступні цілі:

- оцінити економічну ефективність впровадження проекту по відбору тепла із лінії АПО масла на КС (термін окупності, економічний ефект) в залежності від вибору методики розрахунку;
- довести переваги методу імітаційного моделювання Монте-Карло перед іншими методами при проведенні оцінки ефективності проекту по відбору тепла з АПО.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема використання різних статистичних та імітаційних методів оцінки ризиків в проектах з енергозбереження достатньо глибоко досліджується багатьма вченими у їх роботах, зокрема у [2], де розглянуто методичні особливості оцінки еколого-економічної ефективності інвестиційних проектів з енергозбереження. У [3] розглянуті проблемами енергетичного сервісу та оцінки ризиків, що виникають у таких проектах. Робота [4] присвячена зниженню та оцінці ризиків в проектах із енергоефективності, зокрема різними методами визначається ймовірність виникнення ризиків та подано кількісну оцінку важкості наслідків від їх реалізації.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

На сьогодні у світі діють декілька механізмів спрямування коштів у енергоефективність. Джерелом фінансування більшості програм є донори та міжнародні фінансові організації. Іншим джерелом фінансування заходів із енергоефективності є власні кошти підприємств та кошти енергосервісних компаній (ЕСКО) [5, 6]. Нажаль, відсоток використання таких коштів є невисоким, у першу чергу через недостатній розвиток ризик орієнтованого підходу до впровадження енергоефективних проектів.

Авторами визначено оптимальну методологію для розрахунку економічного ефекту, на прикладі впровадження інвестиційного проекту по відбору тепла із лінії автоматичного повітряного охолодження АПО масла під час роботи компресорної станції КС по транспортуванню природного газу

Висвітлення основного матеріалу.

Для вирішення поставлених цілей дослідження розглянемо інвестиційний проект, який полягає у встановленні теплообмінника на лінії трубопроводів системи охолодження масла ГПА та підігріву теплоносія системи опалення компресорної станції шляхом передачі тепла від масла до теплоносія. Передане тепло буде направлено для підігріву теплоносія, який використовується для обігріву приміщень в опалюваний період та підтримання ГПА у так званому «гарячому резерві» за рахунок передачі тепла від теплоносія до масла не працюючих ГПА [7], а відведене з підшипникових вузлів газотурбінного двигуна і нагнітача ГПА тепло, забезпечить економію електроенергії для роботи двигунів вентиляторів системи охолодження масла.

Інвестиційний проект коштує 2600 тис. грн. на одну КС. Для впровадження вибрано 7 КС одного із магістральних газопроводів.

Обсяг прогнозованого транзиту ГТС України на 2020-2024 роки складає 225 млрд м³. Проект розрахується на 5 років, тобто на період гарантованого завантаження газотранспортної системи ГТС.

Основними показниками економії енергоресурсів у разі роботи запропонованого проекту будуть:

- кількість зекономленого газу котельнею;
- кількість зекономленої електроенергії підігрівачами масла;
- кількість зекономленої електроенергії двигунами вентиляторів АПО масла.

Слід зауважити, що при реалізації проекту економію газу на роботу котельні буде отримано тільки при роботі КС в опалюваний період. Економія електроенергії буде протягом усього періоду роботи КС, оскільки під час роботи КС на одному із резервних агрегатів потрібно підтримувати системи у готовності до пуску. Економія електроенергії через зменшення часу роботи двигунів вентиляторів узятя із розрахунку річного напрацювання КС та економії від зменшення роботи двигунів вентиляторів АПО масла із одного ГПА. Це пов'язано із тим, що у опалюваний період, відбір тепла із масла буде більшим і економія буде отримана від роботи декількох АПО масла, а у літній період буде часткова економія на одному із АПО масла.

На сьогодні в ГТС України діє методика щодо визначення економічного ефекту від впровадження заходів нової техніки [8] (Методика), згідно якої економічний ефект вимірюють як різницю між грошовими доходами завдяки впровадженню та експлуатації заходів і грошовими витратами на розроблення, впровадження та використання заходів.

Основою для розрахунку економічного ефекту застосовується формула (1) методичних рекомендацій [9], які затверджені Державним патентним відомством України.

$$П = Д - В \quad (1)$$

де: П – прибуток від використання заходу енергоефективності; Д – дохід від використання заходу енергоефективності; В – витрати на впровадження заходу енергоефективності.

Дохід визначається як сума частин джерел доходу пов'язаних із заходом енергоефективності. У нашому випадку це вартість зекономленої електроенергії та газу за визначений період використання.

Згідно [12] об'єм скорочення витрат енергетичних ресурсів від реалізації проекту визначають як різницю між кількістю енергоресурсів, яка була використана за останній календарний рік експлуатації та розрахунковою кількістю енергоресурсів при впровадженні заходу енергоефективності.

$$\Delta Q = Q_{д\backslashз} - Q_{п\backslashз} \quad (2)$$

де: ΔQ – об'єм скорочення витрат; $Q_{д\backslashз}$ - кількість енергоресурсів, яка була використана за останній календарний рік експлуатації; $Q_{п\backslashз}$ - розрахункова кількість енергоресурсів при впровадженні заходу енергоефективності.

Ціни на енергоресурси приймаються згідно із діючими тарифами у році по якому розраховується проект [10].

Для можливості прийняття рішення щодо ефективності інвестицій по проекту, було проаналізовано чинники, які вплинуть на економічний ефект при реалізації проекту. Результати однієї із КС показано у таб.1. Для проведення розрахунків ціни на енергоресурси взято із [11,12].

Таблиця 1. Основні техніко-економічні показники проекту, які вплинуть на його ефективність по КС №2

№	Найменування	Одиниці виміру	Значення за 2019 рік
1	Експлуатаційні характеристики проекту		
1.1	Напрацювання КС в опалювальний період	доба	40
1.2	Напрацювання КС за рік	доба	64
1.3	Кількість газу потрачена на роботу котельні	м ³ /рік	192983
1.4	Споживання електроенергії підігрівачами масла	кВт/год	15
1.5	Споживання електроенергії двигунами вентиляторів	кВт/год	22
2	Показники ефективності проекту		
2.1	Кількість зекономленої електроенергії підігрівачами масла	кВт\год	23040
2.2	Кількість зекономленої електроенергії двигунами вентиляторів	кВт\год	21120
2.3	кількість зекономленого газу на роботу котельні	м ³	42648,2
2.4	Середня ціна електроенергії	кВт/год/грн	2,5
2.5	Середня ціна газу	м3/грн	9,2
3	Економічні характеристики проекту		
3.1	Вартість зекономленого газу на роботу котельні	грн	392363,2
3.2	Вартість зекономленої електроенергії	грн	108192,0
3.3	Економічний ефект від заходу всього	тис. грн.	500,6

Провівши таким чином аналіз роботи по усім семи КС було виведено ймовірний економічний ефект від впровадження проекту таб.2

Таблиця 2. Розрахований економічний ефект у разі впровадження заходу енергоефективності за 2019 рік

Компресорна станція	КС №1	КС №2	КС №3	КС №4	КС №5	КС №6	КС №7
Розрахований середній економічний ефект за 2019 рік (тис. грн.)	8,8	500,6	1114,0	345,6	469,2	1702,8	426,0

Для реалізації проекту було вибрано дві КС із найбільшим потенціалом економічного ефекту, це КС №3 та КС №6. Ці КС є ключовими при транспортуванні газу у даному напрямку, крім того вони переобладнанні для роботи у реверсному напрямку перекачки газу. Тому ймовірність їх роботи набагато вища порівняно із іншими КС.

Згідно Методики термін окупності витрат визначають відношенням одноразових витрат (вартість капіталовкладень) до економії (економічного ефекту), отриманої від заходу енергоефективності:

$$C_o = I/E_p \quad (3)$$

де: I – інвестиції у проект грн, E_p – середній економічний ефект за рік.

Термін окупності по КС №3 та КС №6 буде:

$$C_{КС\#3+КС\#6} = (2600 + 2600)/(1114,0 + 1702,8) \approx 1,8 \text{ роки}$$

А загальний економічний ефект, тобто сума зекономлених коштів, за 5 років складе майже 14,1 млн. грн.

Приведена методологія є статичною відносно оцінки руху грошових коштів та не враховує, що вартість грошей з часом змінюється. Тому для оцінки ефективності інвестиційного проекту було використано іншу методику, яка згідно з міжнародними стандартами бізнес-планування, визначає основні показники економічної ефективності інвестиційних проектів.

Із часом зекономлені кошти втрачають у своїй вартості. Тому, для визначення справжньої (приведеної) вартості грошей використовують поняття дисконтування. В результаті, справжньою (приведеною) вартістю грошей є сума майбутніх грошових надходжень, приведених до теперішнього моменту часу з урахуванням певної процентної ставки (ставки дисконтування):

$$k_d = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (4)$$

де: k_d - справжня (приведена) вартість грошей; i - відсоткова ставка; n - номер періоду, кількість років.

Чиста приведена вартість NPV є прибутком від проекту за вирахуванням вартості грошей і доплати за ризик. Математично NPV є сумою дисконтованих грошових потоків проекту. Чиста приведена вартість розраховується з використанням прогнозованих грошових потоків, пов'язаних з планованим інвестиційним проектом, за такою формулою:

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{CF_{1t}}{(1+r)^t}, \quad (5)$$

де: CF_t - чистий грошовий потік з урахуванням інвестицій; r - ставка дисконтування; n - порядковий номер періоду грошового потоку з моменту початку реалізації проекту.

В нашому випадку, чистими грошовими потоками від проекту є сума коштів, зекономлених за рахунок зменшення споживання газу та електроенергії, за вирахуванням суми інвестицій.

Дисконтований термін окупності DPB показує за який період часу інвестиційні витрати будуть покриті за рахунок зекономленої суми коштів, приведеної до теперішнього моменту та визначається за формулою:

$$\sum_{t=1}^n DCF_{0t} = \sum_{t=1}^n I_t, \quad (6)$$

де: DCF_{0t} – дисконтований грошовий потік в період t ; I_t - сума інвестицій в період t .

Згідно розрахунків, дисконтований термін окупності проекту складає 2,2 роки, а дисконтований грошовий потік за 5 років (загальний економічний ефект) – 5,7 млн. грн. рис.2. Таким чином, розрахунок за даною методикою показав збільшення терміну окупності проекту на 22% (з 1,8 до 2,2 років відповідно) та зменшення економічного ефекту на -8,4 млн. грн. (з 14,1 до 5,7 млн. грн. відповідно), порівняно із розрахунками за методикою затвердженою в ГТС України.

Недоліками приведених Методик є те, що вони не враховують факторів (ризиків), які можуть виникнути під час експлуатації проекту енергоефективності та будуть впливати на його ефективність, зокрема:

- 1) не враховується зміна вартості енергоресурсів для розрахунку економічного ефекту;
- 2) не враховується прогнозна кількість діб роботи КС;
- 3) не враховується коливання кількості газу спожитого котельнею за період експлуатації заходу енергоефективності;



Рисунок 1. Дисконтований грошовий потік (NPV) проекту за 5 років

Крім того обидві Методики передбачають точкове значення строку досягнення економічного ефекту, а з точки зору математичного моделювання ймовірність досягнення точкового прогнозованого значення наближається до нуля. Тобто, твердження, що запланований економічний ефект буде досягнуто за конкретний термін, у переважній більшості випадків не досягне.

Таким чином, можна стверджувати, що в умовах постійних змін та факторів невизначеності, точно спрогнозувати показники проекту та вартість зекономлених енергоресурсів – неможливо. А невизначеність та зміни спричиняють ризики, які можуть з певною вірогідністю призвести до тих чи інших втрат.

Для оцінки ризиків та можливості аналізування їх впливу на показники ефективності інвестиційного проекту було вибрано метод імітаційного моделювання Монте-Карло. Моделювання за методом Монте-Карло дозволяє отримати розподіл ймовірностей можливих значень показників NPV та терміну окупності проекту [13].

Для початку, вибрано основні ризики, які можуть впливати на показники економічної ефективності інвестиційного проекту:

- коливання кількості діб напрацювання компресорної станції за рік;
- коливання кількості діб напрацювання компресорної станції;
- коливання вартості природного газу;
- коливання вартості електроенергії;
- коливання обсягів споживання природного газу котельнею.

Для можливості імітаційного моделювання ризиків, по кожному з визначених ризик-факторів вказуємо його «базове значення». Далі, за допомогою методу експертних оцінок, визначаємо відповідні діапазони відхилень від базового значення (відхилення по ризику «-»), відхилення по ризику «+»), див. табл. 3.

Таблиця 3. Ризик-фактори та діапазони відхилень від їх базових значень

Ризик-фактор	Одиниця виміру	Відхилення по ризику "-"	Відхилення по ризику "+"	Мін.	Базове значення	Макс.
Середня ціна газу	грн/м3	-10%	50%	5,7	6,4	9,5
Середня ціна е/е	грн/кВт*год	-10%	30%	2,5	2,8	3,7
Споживання газу котельнею КС3	тис. м3	-10%	10%	122	136	150
Споживання газу котельнею КС6	тис. м3	-10%	10%	155	172	189
Напрацювання КС3 в опалювальний період	діб	-10%	20%	97	108	130
Напрацювання КС3 за рік	діб	-10%	20%	225	250	300
Напрацювання КС6 в опалювальний період	діб	-10%	20%	131	145	174
Напрацювання КС6 за рік	діб	-10%	20%	253	281	337

Коливання вартості природного газу та електроенергії залежить від цін на світовому ринку енергоресурсів. Середню ціну газу було закладено в діапазоні (-10% до 50%) так як аналіз цін за 3 роки показав, що середня ціна газу коливалась від 11,85 грн/м³ у 2018 році до 5,5 грн/м³ у березні 2020 року. Вірогідність того, що ціна газу продовжить знижуватись є невисокою так як вона майже досягла свого мінімуму. Середню ціну електроенергії було закладено в діапазоні (-10% до 30%). Аналіз цін за 3 роки показав стійке зростання ціни, тому вірогідність коливання ціни в більшу сторону є вищою.

Коливання кількості діб напрацювання компресорної станції у опалюваний період та за поточний рік в цілому залежить від режиму роботи ГТС. Напрацювання компресорної станції було закладено в діапазоні (-10% до 20%). Коливання вірогідності у більшу сторону пов'язано із тим, при плануванні режиму роботи ГТС диспетчерське управління буде надавати перевагу роботі саме цих КС, так як завдяки реалізації проекту їх робота буде більш енергоефективною. Стабільність обсягу транспортування газу ГТС закладена у контракті із Газпромом.

Коливання обсягів споживання природного газу котельнею, залежить від середньої температури повітря у опалювальний період. Споживання природного газу котельнею закладено в діапазоні (-10% до 10%) так як прорахувати його майже не можливо.

Це дозволяє сформувати діапазон допустимих значень для кожного з ризик-факторів («мінімальне значення», «максимальне значення»), рис. 2



Рисунок 2. Ризик-фактори та діапазони відхилень від їх базових значень

Далі за допомогою спеціалізованого програмного додатку ModelRisk, інтегрованого в Excel, для кожного ризик-фактору ми задали функцію розподілу ймовірностей PERT. Саме даний вид розподілу був вибраний з огляду на те, що він призначений для формування математичних моделей експертних оцінок, де задається «мінімальне», «базове» (тобто найімовірніше) та «максимальне» значення у вигляді припущень експертів. Типовий графік PERT-розподілу показаний на рисунку 3, де по осі X вказані значення показника в діапазоні від 0 до 50, по осі Y – величина ймовірності в діапазоні від 0 до 10%.

Графіки розподілу ймовірностей (PERT-розподіл), які були змодельовані додатком ModelRisk для ризик-факторів «Середня ціна газу» показані на рисунку 4.

По осі X вказано ймовірні значення ризик-фактору, а по осі Y- ймовірність кожного зі значень, виражена у частках (0.01=1%).

Наприклад, діапазон ймовірних значень для ризик-фактору «Середня ціна на газ» складає від 5,7 до 9,5 тис. грн./м³. І відповідно ймовірність того, що ціна буде нижчою за 5,9 тис. грн./м³ складає 5%, нижчою за 7,99 тис. грн./м³ – 95% і т.д.

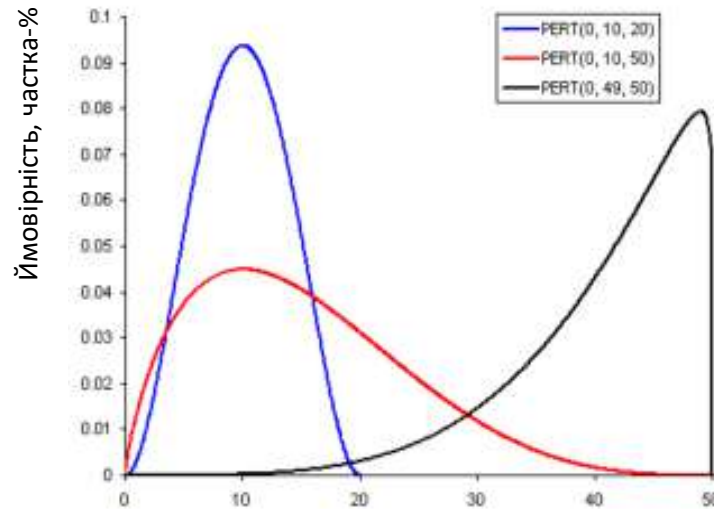


Рисунок 3. Графік функції розподілу ймовірностей PERT для імітаційного моделювання ризик-факторів

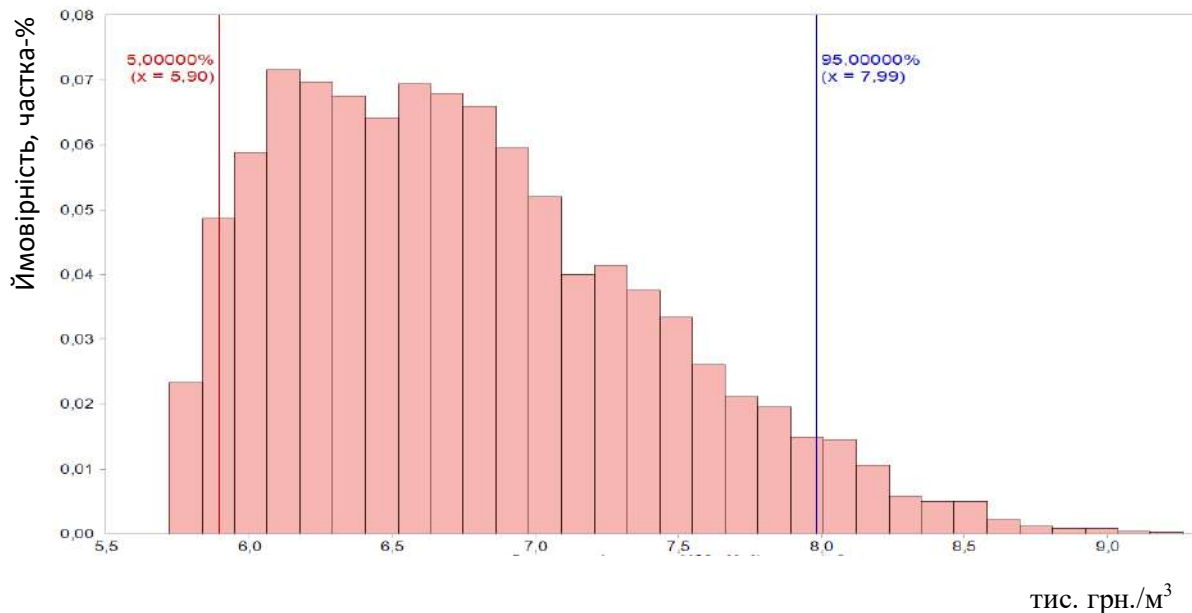


Рисунок 4. PERT-розподіл для ризик-фактору «Середня ціна газу»

Згідно отриманих результатів розподілу ймовірностей можливих значень показнику NPV проекту (рис.5, по осі X вказано ймовірні значення NPV, а по осі Y- ймовірність кожного зі значень), ми можемо зробити наступні висновки:

- ймовірність того, що сукупно за 5 років показник NPV проекту становитиме 5,7 млн. грн. складає 0% (значення NPV що вище за 5,7 не попадає в даний діапазон ймовірностей, що свідчить про ризиковано оптимістичні результати розрахунків за попередніх методик);
- ймовірність того, що сукупно за 5 років показник NPV проекту буде більшим ніж 3,48 млн. грн. складає 5% ;
- ймовірність того, що сукупно за 5 років показник NPV проекту буде в діапазоні від 1,38 до 3,48 млн. грн. складає 90%.

Результати розрахунку показують, що моделювання за методом Монте-Карло дає набагато більш повне уявлення про вплив ризиків на фінансовий результат проекту. При прийнятті рішень, це дозволяє судити не тільки про те, до яких наслідків можуть призвести ризики, але і про те, наскільки ймовірними вони є.

Аналогічно, за допомогою методу Монте-Карло проаналізовано показник окупності проекту (рис. 6, по осі X вказано ймовірні значення терміну окупності проекту, а по осі Y- ймовірність кожного зі значень):

- ймовірність того, що проект окупиться менш, ніж за 2,2 роки складає близько 0,04% (що свідчить про занадто ризиковано оптимістичні результати розрахунків попередніх методик, де термін окупності складав 1,8 та 2,2 роки відповідно);
- ймовірність того, що проект окупиться за 3,8 років, складає близько 95%.

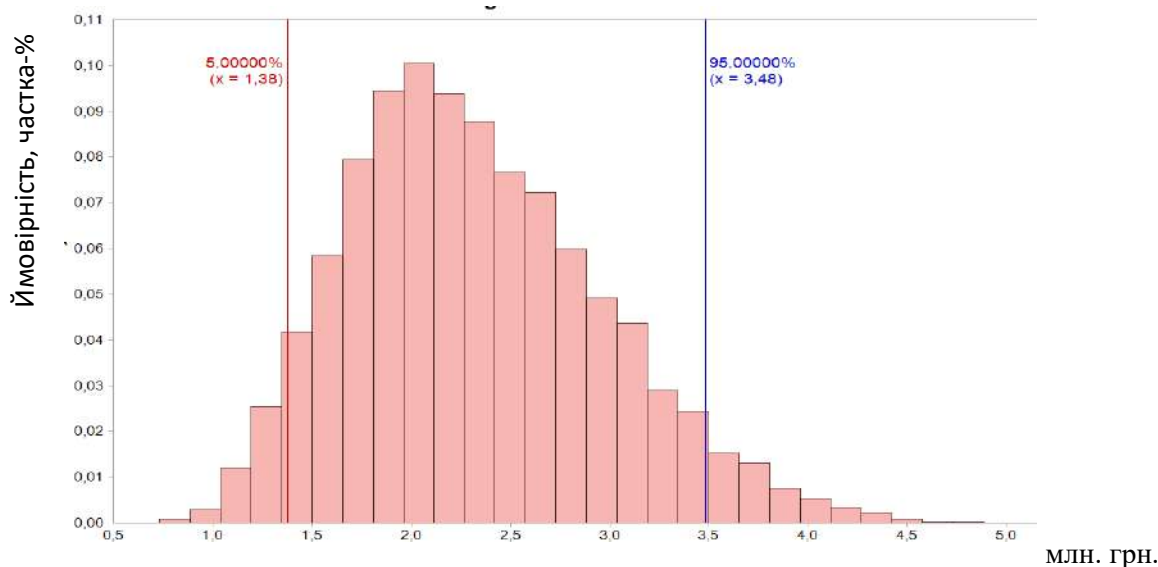


Рисунок 5. Моделювання методом Монте-Карло показника NPV проекту

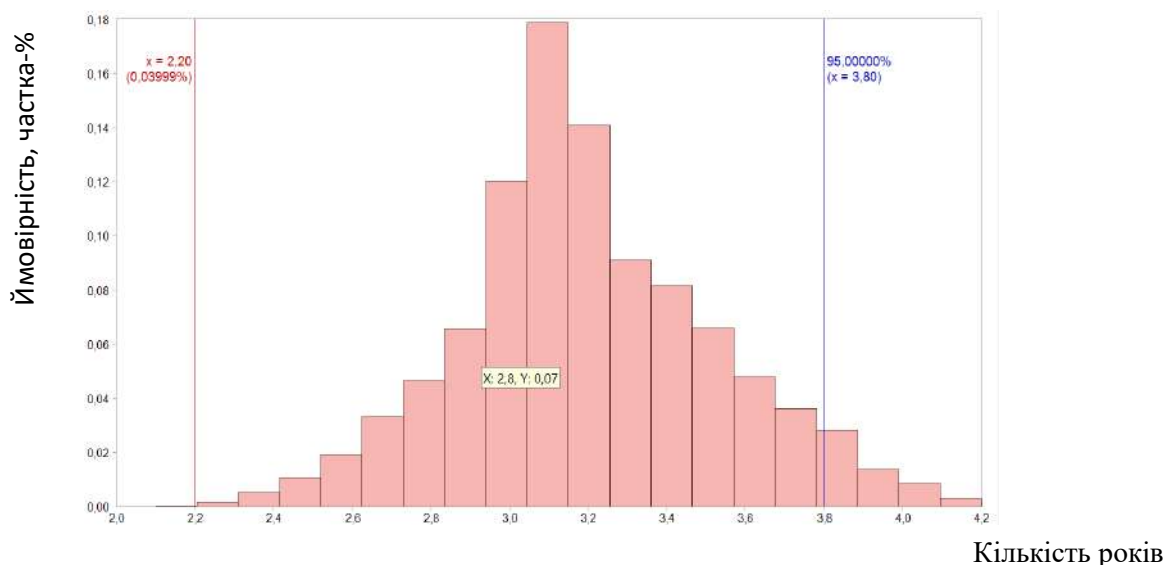
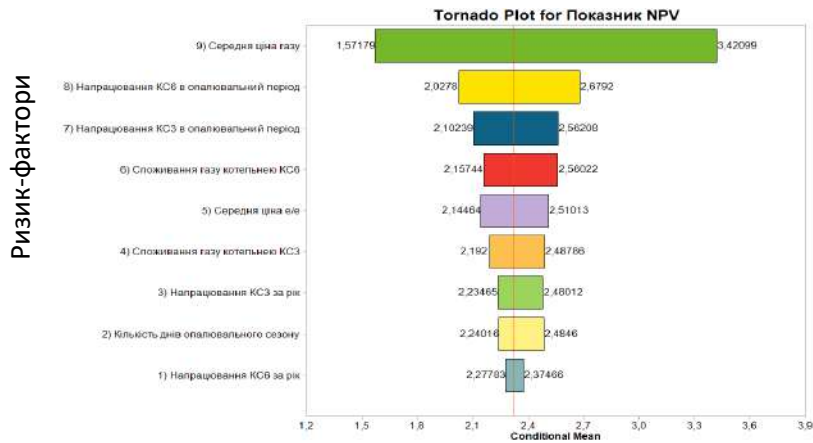


Рисунок 6. Моделювання методом Монте-Карло показника терміну окупності проекту

Одним з результатів при проведенні моделювання по методу Монте-Карло є діаграма Торнадо, що дозволяє визначити, які ризик-фактори мають найбільший вплив на показники ефективності проекту.

Діаграма Торнадо (рис.7, по осі X вказано ймовірні значення NPV проекту, а по осі Y- ризик фактори проекту) показує, що найбільш впливовими ризик-фактори є ціна на газ та напрацювання в опалювальний період КС3 та КС6, а також кількісно оцінити їх вплив на показники ефективності проекту. Наприклад, при визначених ризиках щодо зміни ціни на газ, відхилення показника NPV від базового значення (-0.5 млн. грн.) може бути в діапазоні від -1.492 до 0.415 млн. грн. Це і є діапазон невизначеності показника NPV в залежності від ризиків зміни ціни на газ в період реалізації проекту.



млн. грн.

Рисунок 7. Діаграма Торнадо для показника NPV проекту

В результаті проведеного аналізу щодо застосування різних підходів та методик оцінки ефективності проектів, можемо зробити наступні **висновки**:

1) Обґрунтування ефективності проектів, що базуються на детермінованих розрахунках показників проекту в статичних межах (наприклад, в середньому за рік) – морально застаріла методика, яка звужує погляд, обмежує мислення та призводить до хибних оцінок в процесі прийняття рішень щодо доцільності реалізації проекту.

2) Методика бізнес-планування, яка враховує фактор зміни вартості грошей у часі, дозволяє проаналізувати та оцінити показники ефективності проектів в динаміці (зі зміною у часі). Проте дана методика базується на розрахунках точкових значень та не враховує вплив змінних факторів та ризиків на показники ефективності проекту.

3) Мислення діапазонами дозволяє розглянути проект, через призму ймовірнісного розподілу можливих значень показників ефективності проекту. Метод Монте-Карло дозволяє виконати імітаційне моделювання ризиків та максимально достовірно спрогнозувати майбутню ефективність проекту в залежності від змінних факторів (ризиків).

Застосування методу Монте-Карло дозволяє проаналізувати всі можливі наслідки рішень в ході реалізації проекту і оцінити вплив ризиків на показники ефективності проекту, що забезпечує більш високу ефективність прийняття рішень в умовах невизначеності.

Список використаної літератури

1. Енергоємність валового внутрішнього продукту України: передумови зниження/ І. Мазур // вісник ТНЕУ №1. 2012 С. 64-72.
2. Теліженко О.М., Вакуленко І.А, Мирошніченко Ю.О. Методичні підходи до оцінки соціо-еколого-економічної ефективності інвестиційних проектів з енергозбереження \ \ Энергосбережение Энергетика Энергоаудит №11 (130) 2014 С.40-51.
3. Lee P., Lam P. T. I., Lee W. L. Risks in Energy Performance Contracting (EPC) projects // Energy and Buildings. – 2015. – № 92. – С.116–127
4. Уилл Блис и Мэттью Сэйвидж Доклад о Программе по энергетике, охране окружающей среды и управлению ресурсами EERG PP 2011/01 Финансирование энергоэффективности: Стратегия снижения риска кредитования.
5. Shang T., Zhang K., Liu P., Chen Z., Li X., Wu X. What to allocate and how to allocate?—Benefit allocation in Shared Savings Energy Performance Contracting Projects // Energy. – 2015. – № 91. – С. 60–71.
6. Mathew P., Kromer J. S., Sezgen O., Meyers S. Actuarial pricing of energy efficiency projects: lessons foul and fair // Energy Policy. – 2005. – № 33. – 10. – С. 1319–1328.
7. Відбір тепла із лінії трубопроводів охолоджуючого масла газоперекачуючого агрегату та способи його ефективного використання/ І. В. Рибіцький, В. І. Трофімчук - Вісник КрНУ-6/2019 (119) С. 133-139.
8. Методичні положення визначення економічного ефекту від упровадження нової техніки та оцінювання ефективності капітальних вкладень у транспортування газу, зі змінами та доповненнями від 18.08.2011р.- Київ. ПАТ «Укртрансгаз».

9. Методичні рекомендації „Визначення прибутку від використання об’єктів промислової власності” наказ Держпатенту України від 26 серпня 1998 р. N 80

10. ДСТУ 2155-93. Энергозбереження. Методи визначення економічної ефективності заходів по енергозбереженню. С.4.

11. Ціна газу для промисловості URL: <http://www.naftogaz.com>.

12. Ціна електроенергії для промисловості URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=15985>

13. Бикова О.Г.. Автореферат. Імітаційне моделювання управління ризиками інвестиційних проектів. Москва 2003. URL <http://economy-lib.com/disser/89962/a#?page=19>.

УДК 691.263

Трофимчук В.И., начальник отдела энергоэффективности, ORCID 0000-0002-2102-4605

ООО «Оператор ГТС Украины»

Савельев В.Г., менеджер по стратегии, магистр компьютерных систем

Группы "1+1 медиа"

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ ПРОЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Рассмотрены три методики для расчета экономического эффекта на примере внедрения инвестиционного проекта по отбору тепла из линии автоматического воздушного охлаждения масла при работе компрессорной станции по транспортировке природного газа. Для возможности принятия решения об эффективности инвестиций по проекту, проанализированы факторы, которые повлияют на экономический эффект при реализации проекта. Представлено действующую в газотранспортной системе методику по расчету экономического эффекта. Данная методика является статической относительно оценки движения денежных средств и не учитывает, что стоимость денег с течением времени изменяется. Эффективность инвестиционного проекта рассчитано по другой методике, согласно международным стандартам бизнес-планирования, которая определяет основные показатели экономической эффективности инвестиционных проектов. Недостатками приведенных методик является то, что они не учитывают факторов (рисков), которые могут возникнуть во время эксплуатации проекта энергоэффективности и будут влиять на его эффективность. Для оценки рисков и возможности анализа их влияния на показатели эффективности инвестиционного проекта было выбрано метод имитационного моделирования Монте-Карло. Определены основные риски, которые могут влиять на показатели экономической эффективности инвестиционного проекта. Применение метода Монте-Карло позволило проанализировать все возможные последствия решений в ходе реализации проекта и оценить влияние рисков на показатели эффективности проекта, обеспечило более высокую эффективность принятия решений в условиях неопределенности. Построена диаграмма Торнадо, которая показала, что наиболее влиятельными риск-факторами являются цена на газ и наработка в отопительный период. Диаграмма Торнадо дала возможность количественно оценить влияние риск-факторов на показатели эффективности проекта.

Ключевые слова: экономический эффект; энергоэффективность; метод Монте-Карло; риск; инвестиционный проект; газотранспортная система.

V. Trofimchuk, head of the energy efficiency department, ORCID 0000-0002-2102-4605

Gas Transmission System Operator of Ukraine

V. Saveliev, strategy manager, Master of Computerized Systems

1 + 1 Media Groups

ANALYSIS OF ASSESSING METHODS FOR THE ECONOMIC EFFECT OF ENERGY EFFICIENCY PROJECTS IMPLEMENTATION

Three methods for calculating the economic effect are considered on the example of the implementation of an investment project for the selection of heat from an automatic aircooling line for oil during the operation of a

compressor station for the transportation of natural gas. In order to make a decision on the effectiveness of investments under the project, factors that will affect the economic effect during the implementation of the project are analyzed. A methodology for calculating the economic effect in the gas transmission system is presented. This technique is static with respect to the assessment of cash flows and does not take into account that the value of money changes over time. The effectiveness of the investment project is calculated according to a different method, in accordance with international standards of business planning, which determines the main indicators of the economic efficiency of investment projects. The disadvantages of the above methods are that they do not take into account factors (risks) that may arise during the operation of the energy efficiency project and will affect its effectiveness. To assess the risks and the possibility of analyzing their impact on the performance indicators of the investment project, the Monte Carlo simulation method was chosen. The main risks that may affect the indicators of economic efficiency of the investment project are identified. The application of the Monte Carlo method made it possible to analyze all the possible consequences of decisions during the implementation of the project and evaluate the impact of risks on project performance indicators, and provided higher decision-making efficiency in the face of uncertainty. A tornado chart was built, which showed that the most influential risk factors are gas prices and running hours in the heating period. The Tornado chart made it possible to quantify the impact of risk factors on project performance indicators.

Keywords: *economic effect; energy efficiency; Monte Carlo method; risk; investment project; gas transmission system.*

REFERENCES

1. Enerhoiemnist valovoho vnutrishnoho produktu Ukrainy: peredumovy znyzhennia/ I. Mazur // visnyk TNEU №1. 2012 S. 64-72.
2. Telizhenko O.M., Vakulenko I.A, Myroshnychenko Yu.O. Metodychni pidkhody do otsinky sotsio-ekoloho-ekonomichnoi efektyvnosti investytsiinykh proektiv z enerhozberezhennia \ \ Enerhosberezhnye Enerhetyka Enerhoaudyt №11 (130) 2014 S.40-51.
3. Lee P., Lam P. T. I., Lee W. L. Risks in Energy Performance Contracting (EPC) projects // Energy and Buildings. – 2015. – № 92. – C.116–127
4. Uyll Blys y Mættiu Sæivydzh Doklad o Prohamme po ænerhetyke, okhrane okruzhaiushchei sredy y upravleniyu resursamy EERG PP 2011/01 Fynansyrovanye ænerhoæffektyvnosty: Stratehiya snyzhenyia ryska kredytovanyia.
5. Shang T., Zhang K., Liu P., Chen Z., Li X., Wu X. What to allocate and how to allocate?—Benefit allocation in Shared Savings Energy Performance Contracting Projects // Energy. – 2015. – № 91. – C. 60–71.
6. Mathew P., Kromer J. S., Sezgen O., Meyers S. Actuarial pricing of energy efficiency projects: lessons foul and fair // Energy Policy. – 2005. – № 33. – 10. – C. 1319–1328.
7. Vidbir tepla iz linii truboprovodiv okholodzhuiuchoho masla hazoperekachuiuchoho ahrehatu ta sposoby yoho efektyvnoho vykorystannia/ I. V. Rybitskyi, V. I. Trofimchuk - Visnyk KrNU-6/2019 (119) S. 133-139.
8. Metodychni polozhennia vyznachennia ekonomichnoho efektu vid uprovadzhennia novoi tekhniky ta otsiniuvannia efektyvnosti kapitalnykh vkladen u transportuvannia hazu, zi zminamy ta dopovnenniamy vid 18.08.2011r.- Kyiv. PAT «Ukrtranshaz».
9. Metodychni rekomendatsii „Vyznachennia prybutku vid vykorystannia obiektiv promyslovoi vlasnosti” nakaz Derzhpatentu Ukrainy vid 26 serpnia 1998 r. N 80
10. DSTU 2155-93. Enerhozberezhennia. Metody vyznachennia ekonomichnoi efektyvnosti zakhodiv po enerhozberezhenniu.S.4.
11. Tsina hazu dlia promyslovosti URL: <http://www.naftogaz.com>.
12. Tsina elektroenerhii dlia promyslovosti URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=15985>
13. Bykova O.H.. Avtoreferat. Imitatsiine modeliuvannia upravlinnia ryzykamy investytsiinykh proektiv. Moskva 2003. URL <http://economy-lib.com/disser/89962/a/#?page=19>.

Надійшла 27.06.2020
Received 27.06.2020

М.Ф. Боженко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2649-0901
О.В. Озеруга, магістрант, ORCID 0000-0002-8160-3174
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОРІВНЯЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ УТИЛІЗАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЕЛЕНЬ ЗІ ЗВОЛОЖЕННЯМ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ

Наведені методики і результати розрахунків енергетичної і екологічної ефективності теплоутилізаційних установок з КТАНОм-утилізатором – КТАНОм-повітрянагрівачем, екологічно чистої установка, з поверхневими утилізаторами-калориферами. Розрахунки виконані для теплоутилізаційних установок, встановлених в опалювальній водогрійній котельні в м. Києві за водогрійним котлом КВ-ГМ-10. Показано що теплоутилізаційна установка з поверхневими калориферами характеризується найвищими показниками енергетичної і екологічної ефективності. Вона має найбільший потік утилізованої теплоти (2312 кВт) та найменші експлуатаційні і зведені витрати (25950 та 119140 грн/рік відповідно), а також найменші викиди оксидів азоту з димовими газами (0,06 г/с). Далі за цими показниками розташовується екологічно чиста теплоутилізаційна установка, які відповідно складають 1936 кВт, 68250 та 382090 грн/рік і 0,12 г/с; а установка з КТАНОм-утилізатором – КТАНОм – повітрянагрівачем – характеризується найнижчою енергетичною ефективністю і однаковою з екологічно чистою установкою екологічною ефективністю, аналогічні показники для якої складають 1550 кВт, 87300 та 412700 грн/рік і 0,12 г/с відповідно.

Ключові слова: котельня, димові гази, повітря, температура, теплоутилізатор, тепловий потік, енергетична і екологічна ефективність, капіталовкладення, зведені витрати.

Вступ

Зменшення витрат природного газу в промисловій та комунальній теплоенергетиці, зокрема промисловими ТЕЦ та котельними, може бути досягнуто за рахунок підвищення коефіцієнта його використання.

Відомо, що температура димових газів на виході з багатьох парових та водогрійних котлів перевищує 140 °С, що також характеризується і підвищеними втратами теплоти з димовими газами та низьким ККД цих агрегатів.

Використання теплоутилізаційних установок для глибокого охолодження продуктів згоряння нижче температури точки роси дозволить підвищити їх ефективність та в цілому збільшити ККД котла і зменшити витрату природного газу. Слід зазначити, що витрати на спорудження теплоутилізаційних установок у декілька разів нижчі ніж капіталовкладення на розвідування, добування та транспортування природного газу.

Постановка задачі

При глибокому охолодженні димових газів від них відводиться не тільки «явна» теплота, але й «прихована» з водяними парами, що конденсуються. Для цих потреб можуть бути використані конденсаційні контактні (змішувальні чи плівкові) теплообмінники. Останнім часом для глибокого охолодження димових газів використовуються і поверхневі теплообмінники.

В останні роки підвищуються вимоги до експлуатації паливоспалюючих установок, зокрема, опалювальних та промислово-опалювальних котелень щодо зменшення шкідливих викидів в довкілля.

При спалюванні природного газу шкідливими викидами є оксиди азоту, одним з ефективних методів зниження яких є зволоження дуттьового повітря, наприклад, в контактних повітрянагрівачах.

Також слід зазначити, що зволоження дуттьового повітря призводить до збільшення ентальпії димових газів на виході з котлів – вході в теплоутилізатори і підвищення їх ефективності.

Найпоширенішими теплоутилізаційними установками, які використовуються для глибокого охолодження димових газів та зволоження дуттьового повітря, є контактний теплоутилізатор – контактний повітрянагрівач з активною насадкою, екологічно чиста теплоутилізаційна установка контактного типу, поверхневий теплоутилізатор – калорифер. Дослідження, методики розрахунків та вибору цих теплоутилізаційних установок наведені в роботах Аронова І.З., Семенюка Л.Г., Фіалко Н.М., Кудінова А.А., і інших авторів.

Метою роботи є порівняльний аналіз енергетичної ефективності з урахуванням зведених витрат контактних та поверхневих теплоутилізаційних установок зі зволоженням дуттьового повітря, а також їх екологічної ефективності.

Розрахунки енергетичної та екологічної ефективності виконані для перелічених вище теплоутилізаційних установок, які, як приклад, встановлені в опалювальній водогрійній котельні в м. Києві за водогрійним котлом КВ-ГМ-10.

1. Схеми теплоутилізаційних установок

1.1. Контактний утилізатор – контактний повітрянагрівач з активною насадкою

Опис схеми (рис. 1)

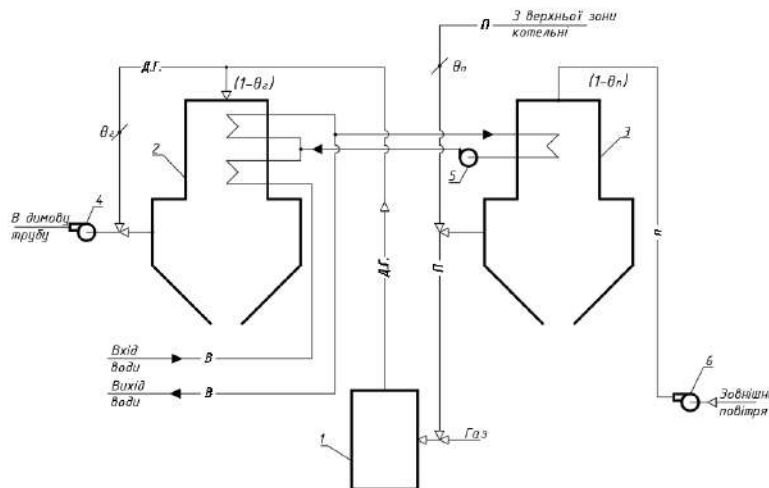


Рисунок 1 - Схема установки з контактним теплоутилізатором – контактним повітрянагрівачем з активною насадкою:

1- водогрійний котел; 2- КТАН-утилізатор; 3- КТАН-повітрянагрівач; 4- димосос; 5- циркуляційний насос; 6- дуттьовий вентилятор;

-в- - вода; -д.г.- - димові гази; -п- - повітря

На рис.1 не показані контури зрошувальної води для КТАНа – утилізатора і КТАНа – повітрянагрівача з ємностями, фільтрами, насосами.

Димові гази після котла надходять на насадку КТАНа – утилізатора, де, змішуючись зі зрошувальною водою, передають «явну» та «приховану» теплоту потоку води, що циркулює усередині насадки. Охолоджені димові гази димососом відводяться в димову трубу.

Частина димових газів по байпасному газоходу спрямовується на підмішування до охолоджених продуктів згоряння. При цьому відповідним коефіцієнтом байпасування θ_g забезпечується температура суміші на вхід до димососа, що перевищує температуру точки роси димових газів і виключає конденсацію водяних парів з димових газів.

В насадці КТАНа- утилізатора нагрівається вода від 5 до 50 °С, частина якої з температурою 50 °С спрямовується до насадки КТАНа – повітрянагрівача, а після її охолодження до 20 °С, подається на нагрів у верхні шари насадки КТАНа – утилізатора.

В КТАНі-повітрянагрівачі здійснюється нагрівання до температури 40 °С та зволоження дуттьового повітря, яке потім спрямовується до пальників котла.

Частина повітря з коефіцієнтом байпасування θ_p з верхньої зони котельні підмішується до зволоженого повітря, що зменшує вірогідність випадіння вологи з повітря на пальниках.

1.2. Екологічно чиста теплоутилізаційна установка контактного типу

Опис схеми (рис. 2). Теплоутилізаційна установка являє собою комбінований контактний теплообмінник, що складається із розміщених в одному корпусі один над одним контактного теплоутилізатора (КТУ) і контактного повітрянагрівача (КПН), об'єднаних у загальний циркуляційний контур насосом 6.

Димові гази з котла надходять в контактну камеру КТУ, де при контакті з водою охолоджуються і димососом подаються в димову трубу. Частина димових газів по байпасному газоходу з коефіцієнтом байпасування θ_g надходять поза КТУ з метою підсушки димових газів, що пройшли утилізатор.

Нагріта в КТУ вода насосом 6 частково подається на контактний повітрянагрівач і після нагрівання та зволоження повітря надходить на КТУ. Решта нагрітої води спрямовується у проміжний теплообмінник, де нагрівається вода зовнішніх споживачів.

Нагріте і зволене у КПП повітря подається до дуттьового вентилятора котла 7. Інколи для підсушування насиченого вологого повітря до нього підмішується сухе повітря з верхньої зони котельні з коефіцієнтом байпасування θ_n .

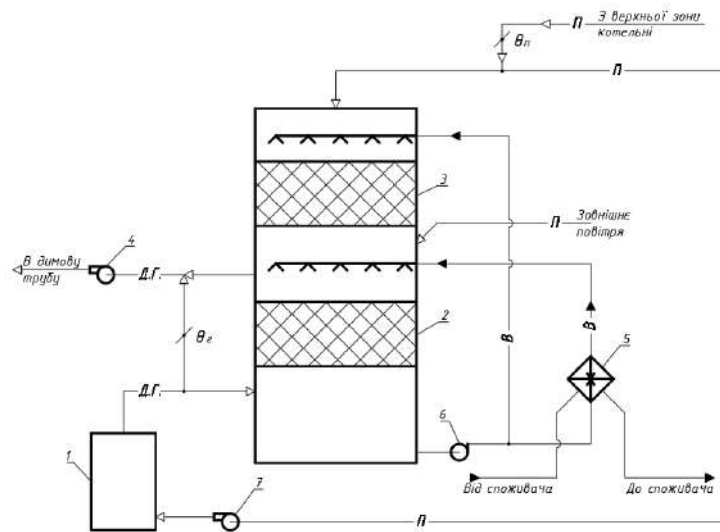


Рисунок 2 - Схема екологічно чистої теплоутилізаційної установки контактного типу:

- 1- водогрійний котел; 2- контактний теплоутилізатор; 3- контактний повітрянагрівач; 4- димосос; 5- проміжний теплообмінник;
- 6- циркуляційний насос; 7- дуттьовий вентилятор;
- д.г.- димові гази; -п- повітря; в- вода

1.3. Поверхневий теплоутилізатор – калорифер

Опис схеми утилізації (рис. 3). Димові гази з котла 1 надходять в міжтрубний простір теплоутилізатора-калорифера 2, де охолоджуються і осушуються та спрямовуються в димову трубу. Для запобігання конденсації водяних парів в газовому тракті і димовій трубі частина димових газів, що визначається коефіцієнтом байпасування θ_g , надходить на підмішування до охолоджених димових газів.

У трубках калориферної установки циркулює вода, яка нагрівається і частково надходить на контактний повітрянагрівач та частково – до зовнішніх споживачів, після яких знову спрямовується до калориферної установки.

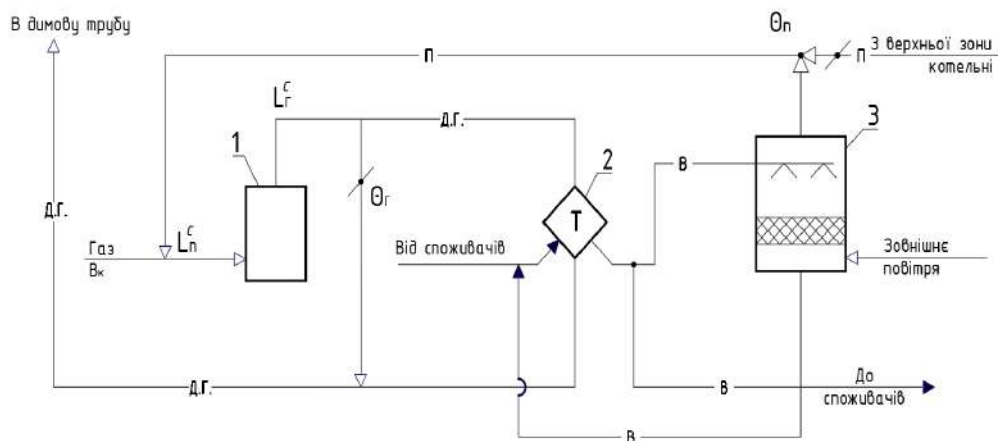


Рисунок 3 - Схема утилізації теплоти димових газів:
 1 – водогрійний котел; 2 – теплоутилізатор-калорифер;
 3 – контактний повітрянагрівач;
 -п- повітря; -д.г.-димові гази; -в-вода

На контактний повітрянагрівач 3 надходить зовнішнє повітря, яке при безпосередньому контакті з водою на насадці, наприклад, з кілець Рашига, нагрівається та зволожується, і спрямовується на газові пальники котлів. Для запобігання випадіння вологи зі зволоженого повітря, відносна вологість якого сягає 95 – 100 %, до нього підмішується повітря з верхньої зони котельні, що характеризується коефіцієнтом байпасування $\theta_{\text{п}}$.

2. Методики розрахунків енергетичної і екологічної ефективності теплоутилізаційних установок

2.1. Енергетична ефективність

Економічний ефект при використанні теплоутилізаторів за опалювальний період, грн/рік, визначається за формулою

$$E\phi = [Q_{\text{ут}} - (Q_{\text{кпн}} - Q_{\text{пп}})] \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{ср.о.}}}{t_{\text{вн}} - t_{\text{р.о.}}} \cdot n_0 \cdot 24 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{к}} - B_{\text{зв}}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{ут}}$ – потік утилізованої теплоти за рахунок охолодження димових газів, кВт; $Q_{\text{кпн}}$ – потік теплоти, що витрачається на зволоження та нагрівання дуттьового повітря в контактному повітрянагрівачі, кВт; $Q_{\text{пп}}$ – потік теплоти, що витрачається на попередній підігрів дуттьового повітря в контактному повітрянагрівачі, кВт; $t_{\text{вн}}$, $t_{\text{ср.о.}}$, $t_{\text{р.о.}}$ – температура внутрішнього повітря в опалюваних приміщеннях, середня за опалювальний період, розрахункова на опалення відповідно, °С; n_0 – продовжуваність опалювального періоду, днів/рік; $C_{\text{к}}$ – вартість теплової енергії, що відпускається від котельні, грн/ГДж; $B_{\text{зв}}$ – зведені витрати на теплоутилізаційну установку, грн/рік.

Потік утилізованої теплоти, кВт, визначається за формулою

$$Q_{\text{ут}} = L_{\text{г}}^c \cdot (1 - \theta_{\text{г}}) \cdot (h_{\text{г}}' - h_{\text{г}}''), \quad (2)$$

де $L_{\text{г}}^c$ – масова витрата сухих димових газів, кг/с; $\theta_{\text{г}}$ – коефіцієнт байпасування; $h_{\text{г}}'$ і $h_{\text{г}}''$ – ентальпії димових газів на вході в теплоутилізатор та виході з нього відповідно, кДж/кг.

Масову витрату сухих димових газів, ентальпії на вході в теплоутилізатор та виході з нього і коефіцієнт байпасування визначали за методикою [1], при цьому для обчислення вологовмісту димових газів на виході з утилізатора і температури точки роси використовували методики робіт [2, 3] відповідно.

Потік теплоти, що витрачається на зволоження та нагрівання повітря в контактному повітрянагрівачі, кВт, визначається за формулою

$$Q_{\text{кпн}} = L_{\text{п}}^c \cdot (1 - \theta_{\text{п}}) \cdot (h_{\text{п}}'' - h_{\text{п}}'), \quad (3)$$

де $L_{\text{п}}^c$ – масова витрата сухого повітря, кг/с; $\theta_{\text{п}}$ – коефіцієнт байпасування за повітрям (в розрахунках приймаємо $\theta_{\text{п}} = 0,2$); $h_{\text{п}}''$ і $h_{\text{п}}'$ – ентальпії повітря на виході з КПН і на вході до нього відповідно, кДж/кг.

Масову витрату сухого повітря, ентальпії на виході з КПН і вході до нього визначали за методикою [4].

Потік теплоти, що витрачається на попередній підігрів дуттьового повітря в контактному повітрянагрівачі, кВт, визначається за формулою

$$Q_{\text{пп}} = L_{\text{п}}^c \cdot (1 - \theta_{\text{п}}) \cdot (t_{\text{п}}'' - t_{\text{п}}'), \quad (4)$$

де $t_{\text{п}}''$ і $t_{\text{п}}'$ – температури повітря на виході з КПН і на вході до нього відповідно, °С.

Зведені витрати, грн/рік, визначаються за формулою

$$B_{\text{зв}} = K_{\text{ут}} \frac{1}{z_{\text{н}}} + (B_{\text{екс}} + aK_{\text{ут}}), \quad (5)$$

де $K_{\text{ут}}$ – капіталовкладення в теплоутилізаційну установку, грн; $z_{\text{н}}$ – нормативний термін окупності додаткових капіталовкладень, років; $B_{\text{екс}}$ – експлуатаційні витрати, грн/рік; a – коефіцієнт амортизаційних відрахувань, 1/рік.

Капіталовкладення в теплоутилізаційну установку включають вартість основного обладнання (теплоутилізатори, контактні повітрянагрівачі) та допоміжного обладнання (теплообмінники, баки, насоси, трубопроводи, та запірно-регульвальна арматура, газоходи і повітропроводи тощо.)

Нормативний термін окупності додаткових капіталовкладень брали для найгіршого варіанту при терміну експлуатації контактних апаратів 4 роки, а коефіцієнт амортизаційних відрахувань $a = 0,25$ 1/рік.

Експлуатаційні витрати, грн/рік, визначаються за формулою

$$B_{\text{екс}} = (\Delta N_{\text{в}} + \Delta N_{\text{д}} + \Delta N_{\text{н}}) \cdot n_0 \cdot 24 \cdot C_{\text{е}}, \quad (6)$$

де $\Delta N_{\text{в}}$ і $\Delta N_{\text{д}}$ – додаткові потужності електроприводів вентилятора, димососа на подолання опорів контактного повітрянагрівача і теплоутилізатора з повітропроводами та газоходами відповідно, кВт; $N_{\text{н}}$ – потужність циркуляційного насоса, кВт; $C_{\text{е}}$ – вартість одиниці електричної енергії, грн/кВт·год (брали $C_{\text{е}} = 1,68$ грн/кВт·год).

Додаткові потужності електроприводів вентилятора і димососа та потужність циркуляційного насоса, кВт, визначали за відомими з гідрогазодинаміки залежностями при ККД вентилятора і димососа $\eta_b = \eta_d = 0,83$, а насоса - $\eta_n = 0,86$.

2.2. Екологічна ефективність

Надходження в топку котла додаткової кількості водяної пари з дуттьовим повітрям сприяє зниженню температури в ядрі факела і зменшенню викидів NO_x з димовими газами [5].

Викидання оксидів азоту в атмосферу (в переліченні на його діоксид), г/с, при спалюванні природного газу у разі зволоження дуттьового повітря обчислювали за методикою, використаною в [1].

Загальні вихідні дані до розрахунків енергетичної і екологічної ефективності теплоутилізаційних установок наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Загальні вихідні дані

Найменування величини	Позначення	Одиниця	Значення величини
1	2	3	4
1. Для обраного котла:	-	-	
- тип	t'_r	°C	КВ-ГМ-10
- температура димових газів на виході	B_k	м ³ /год	185
- витрата природного газу	G_r^c	кг/м ³	1260
- маса сухих димових газів	L_r^c	кг/с	13,42
- масова витрата сухих димових газів	$L_{п}^c$	кг/с	4,7
- масова витрата сухого повітря			4,5
2. Температура внутрішнього повітря	$t_{вн}$	°C	20
3. Кліматологічні дані зовнішнього повітря:			
- розрахункова температура на опалення	$t_{p.o.}$	°C	- 22
- середня температура за опалювальний період	$t_{cp.o.}$	°C	- 0.1
- продовжуваність опалювального періоду	n_0	діб	176
4. Розрахункові параметри повітря на вході в КПН:			
- температура	$t'_п$	°C	- 0,1
- відносна вологість	$\phi'_п$	%	83
- вологовміст	$d'_п$	г/кг с.п	3,3
- ентальпія	$h'_п$	кДж/кг	7,5
5. Вартість теплової енергії	Π_k	грн/ГДж (грн/Гкал)	394,85 (1654,41)

3. Розрахунки енергетичної ефективності теплоутилізаційних установок

3.1. Контактний теплоутилізатор – контактний повітрянагрівач з активною насадкою

Контактний теплоутилізатор. Для встановлення за котлом КВ-ГМ-10 обираємо типовий контактний економайзер з активною насадкою КТАН-1,5УГ номінальною теплопродуктивністю $Q_{к.е.}^{ном} = 1,5$ МВт (1500 кВт) дійсною площею поверхні теплообміну активної насадки $F_d = 62,4$ м² [4].

Беремо за практичними рекомендаціями температуру повітря після контактного повітрянагрівача з активною насадкою $t''_п = 40$ °C і при його відносній вологості $\phi''_п = 100\%$ за $h-d$ – діаграмою визначаємо вологовміст $d''_п = 48,8$ г/кг с.п.

З рівняння суміші при підмішуванні до зволоженого повітря в КТАНі – повітрянагрівачі повітря з верхньої зони котельні ($t_{в.з} = 30$ °C, $\phi_{в.з} = 30\%$, $d_{в.з} = 8$ г/кг с.п) з коефіцієнтом байпасування $\theta_n = 0,2$ отримуємо вологовміст суміші повітря на вході в топку котла $d_{п}^{cm} = 40$ г/кг с.п

За методикою [4] визначаємо дійсний об'єм водяної пари в димових газах $V_{H_2O}^d = 2,67$ м³/м³ та вологовміст димових газів на вході в КТАН – утилізатор $d'_г = 0,16$ кг/кг с.п.

Беремо в останньому наближенні температуру димових газів на виході з КТАНа-утилізатора $t'_г = 45$ г/кг с.п і визначаємо вологовміст $d'_г = 0,063$ кг/кг с.п; ентальпії $h'_г = 643,3$ кДж/кг і $h''_г = 208,1$ кДж/кг; температуру точки роси димових газів $t_p = 60$ °C та температуру суміші газів $t_r^{cm} = 65$ °C; дійсне значення теплопродуктивності $Q_{гт} = 1550$ кВт і за формулою (2) уточнюємо $\theta_r = 0,24$.

З рівняння теплового балансу визначаємо витрату води, що нагрівається в насадці КТАНа – утилізатора, що дорівнює $G_{вт} = 8,22$ кг/с.

За методикою [4] остаточно визначаємо необхідну площу поверхні теплообміну активної насадки $F_{к.с.} = 62,6 \text{ м}^2$ і різницю між дійсною і необхідною площею поверхні теплообміну активної насадки $\delta F = 0,3\%$, що менше ніж максимальна різниця в 5%.

Контактний повітрянагрівач. Для нагрівання і зволоження повітря обираємо аналогічний КТАН – повітрянагрівач – 1,5УГ.

Ентальпія повітря на виході з повітрянагрівача складає $h''_п = 165,5 \text{ кДж/кг}$ Тоді за формулою (3) визначаємо потік теплоти, що витрачається на зволоження та нагрівання повітря $Q_{кпн}$; а за формулою (4) – потік теплоти, що витрачається на попередній підігрів дуттьового повітря в контактному повітрянагрівачі $Q_{пп}$.

За рівнянням теплового балансу при $t''_в = 50 \text{ °C}$ і $t'_в = 20 \text{ °C}$ визначаємо витрату води з КТАНа – утилізатора на КТАН – повітрянагрівач $G_{зв} = 4,5 \text{ кг/с}$, а за різницею $G_{вт}$ і $G_{зв}$ - витрату води з температурою $t''_в = 50 \text{ °C}$, що спрямовується зовнішнім споживачам, що складає $3,72 \text{ кг/с}$.

При визначенні *капіталовкладень* в теплоутилізаційну установку враховували:

- вартість КТАНа – утилізатора -1,5УГ та КТАНа – повітрянагрівача -1,5УГ з ємностями зрошувальної води, фільтрами, насосами, трубопроводами $K_k = 500000 \text{ грн}$;
- вартість насосів циркуляції нагрітої в КТАНі – утилізаторі води до насадки КТАНа – повітрянагрівача та подавання води до споживачів $K_n = 46820 \text{ грн}$;
- вартість трубопроводів, газоходів та повітропроводів $K_t = 104000 \text{ грн}$.

3.2. Екологічно чиста теплоутилізаційна установка контактного типу

До заданих або визначених раніше величин $B_k, t'_r, d'_r, L'_r, h'_r, t'_п, t''_п, \theta_п, h'_п, h''_п, L'_п, d''_п$ додатково задавали

- параметри продуктів згоряння на виході з КТУ: температуру $t''_r = 30 \text{ °C}$; відносну вологість $\varphi''_r = 100\%$; коефіцієнти байпасування поза КТУ $\theta_r = 0,25$;
- температури потоків води: циркуляційного контура: перед КТУ $t'_ц = 15 \text{ °C}$; після КТУ $t''_ц = 50 \text{ °C}$; зовнішніх споживачів: на вході в теплообмінник $t'_сн = 5 \text{ °C}$; на виході з теплообмінника $t''_сн = 40 \text{ °C}$.

Контактний повітрянагрівач. Для контактного повітрянагрівача за формулою (3) визначали теплову потужність $Q_{кпн}$, а за формулою (4) – потік теплоти, що витрачається на попередній підігрів дуттьового повітря $Q_{пп}$.

За методикою [4] визначали витрату циркуляційної води на КПП $W_{кпн} = 3,88 \text{ кг/с}$; середній вологовміст повітря в КПП $\bar{d}_п = 16,9 \text{ г/кг с.п}$; середню температуру повітря в КПП $\bar{T}_п = 292,5 \text{ К}$; середню густину повітря в КПП $\bar{\rho}_п = 1,199 \text{ кг/м}^3$; середню об'ємну витрату повітря, що проходить через КПП $\bar{V}_п = 3,05 \text{ м}^3/\text{с}$; площу поперечного перерізу КПП (при швидкості повітря $v_п = 1,5 \text{ м/с}$) $f_{кпн} = 2,03 \text{ м}^2$.

Контактний теплоутилізатор. Для контактного теплоутилізатора при температурі димових газів на виході $t''_r = 30 \text{ °C}$ визначали їх вологовміст $d''_r = 0,025 \text{ кг/кг с.п}$ та ентальпію $h''_r = 94 \text{ кДж/кг}$, а за формулою (2) - потік утилізованої теплоти в КТУ $Q_{кту}$.

За рівнянням теплового балансу визначається витрата циркуляційної води, яка нагрівається в КТУ, що складає $13,2 \text{ кг/с}$.

За різницею теплових потоків $Q_{кту}$ і $Q_{кпн}$ визначали витрату теплоти на нагрівання води зовнішніх споживачів $Q_{сн} = 1367 \text{ кВт}$, а за рівняннями теплового балансу - витрату води зовнішніх споживачів, що нагрівається в проміжному теплообміннику $G_{сн} = 9,32 \text{ кг/с}$, а також витрату циркуляційної води на проміжний теплообмінник $W_{сн} = 9,32 \text{ кг/с}$.

Для запобігання конденсації водяних парів з димових газів в газовому тракті та димовій трубі за методикою [4] визначали: ентальпію суміші $h_{с.г.} = 231,3 \text{ кДж/кг}$; вологовміст суміші $d_{с.г.} = 0,052 \text{ кг/кг с.г}$; її температуру $t_{с.г.} = 75 \text{ °C}$, що на 15 °C перевищує температуру точки роси, тобто виключається конденсація водяних парів. Середні параметри димових газів в контактному теплоутилізаторі: вологовміст $\bar{d}_r = 0,073 \text{ кг/кг с.г}$; температура $\bar{T}_r = 375,2 \text{ К}$. Середня густина димових газів $\bar{\rho}_r = 0,94 \text{ кг/м}^3$. Середня об'ємна витрата димових газів, які проходять через утилізатор, $\bar{V}_r = 4,22 \text{ м}^3/\text{с}$.

Оскільки КТУ розміщується в одному корпусі з КПП, то беремо площу поперечного перерізу КТУ такою ж як і для КПП, тобто $f_{кту} = f_{кпн} = 2,03 \text{ м}^2$ і з рівняння суцільності визначаємо швидкість димових газів в КТУ $v_r = 1,98 \text{ м/с}$, що відповідає рекомендованому значенню. Тоді сторона квадрата перерізу КТУ і КПП дорівнюватиме $a = 1,425 \text{ м}$, тобто за каталогом обираємо екологічно чисту теплоутилізаційну установку ЕКТ-15 зі стороною квадрата 15 дм .

Проміжний теплообмінник. Обираємо секційний водо-водяний теплообмінник, в якому воду циркуляційного контуру витратою $W_{\text{сп}}$ спрямовуємо в трубки, а воду зовнішніх споживачів витратою $G_{\text{сп}}$ – у міжтрубний простір. Розрахунки виконуємо за методикою [4], в результаті обчислення площі теплопередавальної поверхні $F = 60,8 \text{ м}^2$ обираємо 9 секцій з площею поверхні нагріву кожної $F_c = 6,98 \text{ м}^2$ та довжиною трубок 4000 мм. Втрати тиску в трубному і міжтрубному просторах відповідно складають $\Delta P_{\text{тр}} = 181,5 \text{ кПа}$; $\Delta P_{\text{мтр}} = 133,4 \text{ кПа}$.

При визначенні *капіталовкладень* в теплоутилізаційну установку брали:

- вартість екологічно чистої теплоутилізаційної установки з урахуванням газоходів, повітропроводів, трубопроводів $K_c = 460000 \text{ грн}$;
- циркуляційний насос фірми Wilo вартістю $K_{\text{нц}} = 84 \text{ 170}$ грн та аналогічний насос для подачі води до зовнішніх споживачів $K_{\text{нс}} = 84 \text{ 170}$ грн;
- проміжний теплообмінник вартістю $K_{\text{пт}} = 84 \text{ 170}$ грн.

3.3. Поверхневий теплоутилізатор – калорифер

Калориферна установка.

Теплопродуктивність калориферної установки, кВт, визначається за формулою

$$Q_k = q_{\text{к.г.}} \cdot L_k^c,$$

де $q_{\text{к.г.}}$ – максимальна питома кількість теплоти, що може бути відведена при глибокому охолодженні димових газів, кДж/кг с.г.

Згідно з результатами попередніх досліджень [6] встановлено, що оптимальна температура зволоження повітря, яке потім подається на пальники котла, складає $t''_n = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Тоді з урахування оптимального коефіцієнта байпасування $\theta_r = 0,265$ та кінцевої температури охолоджених газів для котла КВ-ГМ-10 величина $q_{\text{к.г.макс}} = 492 \text{ кДж/кг с.г}$ [6] і, відповідно, $Q_k = 2312 \text{ кВт}$.

Після визначення вологовмісту повітря на виході з КПН та його ентальпії, які відповідно склали $d''_n = 86,3 \text{ г/кг с.п}$ і $h''_n = 260,6 \text{ кДж/кг}$ та при коефіцієнті байпасування $\theta_n = 0,2$ за формулою (3) визначали витрати теплоти на контактний повітрянагрівач $Q_{\text{кпн}}$, а за формулою (4) – витрати теплоти на попередній підігрів дуттьового повітря $Q_{\text{пп}}$.

Визначення кінцевої температури нагріву води в калориферах t''_b , $^\circ\text{C}$.

Слід зазначити, що теплотехнічні показники поверхневих теплообмінників, у яких повинна відбуватися конденсація водяних парів з димових газів, визначається температурами теплоносія, що нагрівається.

При нагріванні води необхідно забезпечити умову, щоби температура стінки була нижча за температуру точки роси.

Якщо $t'_b < t_{\text{ст}} < t_p$, то конденсація H_2O , буде відбуватися на всій поверхні теплообміну, а якщо $t'_b < t_{\text{ст}} < t_p$, то тільки на тій частині поверхні, де $t_{\text{ст}} < t_p$ [5].

При спалюванні природного газу без зволоження повітря $t_p = 52 - 55 \text{ }^\circ\text{C}$, тоді кінцева температура води не повинна перевищувати $50 \text{ }^\circ\text{C}$. У разі зволоження повітря ($t_{\text{пов}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$) $t_p = 63 \text{ }^\circ\text{C}$, тоді, очевидно, температура води, що нагрівається, може бути досягнута біля $57 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

До вихідних даних для *вибору калориферних установок*, окрім наведених вище теплопродуктивності Q_k та температури димових газів на вході t'_r , відносяться витрата димових газів з урахуванням байпасування $L_k^c = 3,45 \text{ кг/с}$; температура димових газів на виході $t''_r = 270 \text{ }^\circ\text{C}$ [6]; температури води на вході: $t'_b = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ і на виході $t''_b = 58 \text{ }^\circ\text{C}$.

За методикою [4] у першому наближенні обрані 8 калориферів КСк 3 – 9 з площею теплопередавальної поверхні кожного $F_{\text{д1}} = 23,4 \text{ м}^2$. Всі калорифери в установці розміщені паралельно за напрямком руху води і чотири з них – паралельно за напрямком руху димових газів.

За рівнянням теплового балансу визначали витрату води $G_b = 10,4 \text{ кг/с}$, а з рівняння суцільності – її швидкість в трубках калориферів $\omega_b = 1,12 \text{ м/с}$.

Коефіцієнт теплопередачі від димових газів до води для ребристої багатощарової стінки в калорифері при віднесенні теплового потоку до ребреної поверхні визначали за методикою [5], при цьому при визначенні коефіцієнта тепловіддачі на зовнішній поверхні враховували її зрошення конденсатом водяних парів з димових газів.

При визначенні коефіцієнті теплопередачі $K_{\text{оп}} = 109,6 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ і середньому температурному напорі $\Delta \bar{t} = 58,1 \text{ }^\circ\text{C}$ необхідна площа поверхні нагріву калориферної установки складе $F_T = 347,3 \text{ м}^2$. Оскільки $\Sigma F_{\text{д}} < F_T$, то до восьми калориферів типу КСк 3-9 послідовно встановлюємо ще вісім аналогічних

калориферів, тоді $\Sigma F_d = 374,4 \text{ м}^2$, а запас дійсної поверхні нагріву по відношенню до необхідної складатиме біля 7%, що близько до рекомендованого значення цієї величини.

Контактний повітрянагрівач.

Контактні повітрянагрівачі в системах утилізації теплоти димових газів котельень, як зазначено в роботі [7], використовуються не тільки для економії палива за рахунок його природного підігріву, а і для отримання екологічного ефекту - зменшення викидів оксиду азоту. В умовах експлуатації цих апаратів температура нагріву дуттьового повітря була всього на 2 - 3 °С нижча за температуру вихідної води [8]. Тобто вода після калориферної установки з температурою $t''_в = 58 \text{ °С}$ може забезпечити нагрів повітря до температури $t''_п = 50 \text{ °С}$.

Як КПН в схемі утилізації теплоти димових газів брали типову конструкцію декарбонізатора, що застосовується для видалення розчинних газів з води в схемах водопідготовки ТЕЦ, котельень, або на підприємствах хімічної промисловості з використанням повітря.

В схемі утилізації декарбонізатор використовується для нагрівання повітря водою (рис. 4).

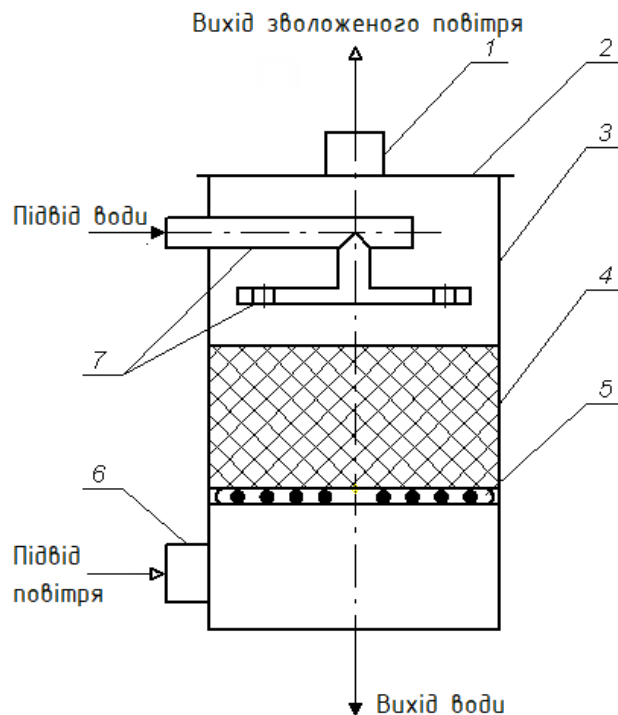


Рисунок 4 - Контактний повітрянагрівач для зволоження повітря:

- 1 - патрубок для відведення повітря; 2 - кришка; 3 - корпус; 4 - насадка; 5 - опорна решітка; 6 - патрубок для входу повітря; 7 - водорозподільний пристрій

Конструктивно повітрянагрівач має циліндричну форму. На опорну решітку хаотично завантажуються кільця Рашига розмірами, наприклад, 25 x 25 x 3 мм.

Через водорозподільчий пристрій надходить вода, яка була нагріта димовими газами у калориферній установці. Знизу через патрубок 6 підводиться зовнішнє повітря. В результаті безпосереднього контакту води з повітрям останнє нагрівається та зволожується і після змішування з повітрям верхньої зони котельні надходить на пальники котла.

При обчисленій за методикою [4] в розрахунках контактних повітрянагрівачів об'ємній витраті повітря $V_п = 3,13 \text{ м}^3/\text{с}$ і площі поперечного перерізу насадки $f_п = 1,84 \text{ м}^2$ за таблицями технічних характеристик обрали типовий декарбонізатор діаметром $D_{ст} = 1,6 \text{ м}$ і площі живого перерізу $f_{ст} = 2 \text{ м}^2$, при цьому швидкість повітря складе 1,565 м/с.

З урахуванням густини зрошення $q = 10,8 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$ та числа Рейнольдса $Re_п = 1500$ за результатами досліджень насадкових контактних економайзерів [9] наближено визначили об'ємну теплову напругу насадки $q_v = 260 \text{ кВт/м}^3$ та висоту шару насадки $H_п = 2 \text{ м}$. Загальна висота декарбонізатора - контактного повітрянагрівача складає 3 м.

При визначенні *капіталовкладень* в теплоутилізаційну установку брали:

- вартість 16 калориферів $K_k = 124990 \text{ грн}$;
- вартість контактного повітрянагрівача $K_{пн} = 60000 \text{ грн}$;
- вартість циркуляційного насоса $K_н = 83750 \text{ грн}$;

- вартість трубопроводів, газоходів і повітропроводів $K_{тр} = 104000$ грн.

Для всіх теплоутилізаційних установок, окрім зазначених вище величин $Q_{кту}$ (Q_k), $Q_{кпн}$ та $Q_{пп}$, визначали сумарні *капіталовкладення* K , за формулою (6) - *експлуатаційні витрати* $B_{екс}$, за формулою (5) – *зведені витрати* $B_{зв}$, а за формулою (1) – економічний ефект $Eф$ (табл. 2).

Таблиця 2 – Порівняльні результати розрахунків енергетичної ефективності

Найменування величини	Позначення	Одиниця	Значення величини для теплоутилізаційних установок		
			КТАН-утилізатор- КТАН- повітрянагрівач	Екологічно чиста установка	Поверхневий калорифер
1. Потік утилізованої теплоти	$Q_{ут}$	кВт	1550	1936	2312
2. Потік теплоти на нагрів і зволоження повітря	$Q_{кпн}$	кВт	569	569	952
3. Потік теплоти на попередній підігрів повітря	$Q_{пп}$	кВт	144	144	180
4. Капіталовкладення	K	грн	650800	627670	372740
5. Експлуатаційні витрати	$B_{екс}$	грн/рік	87300	68250	25950
6. Зведені витрати	$B_{зв}$	грн/рік	412700	382090	119140
7. Економічний ефект	$Eф$	грн/рік	2820000	3960000	4 306000

Як видно з результатів розрахунків, найбільшою енергетичною ефективністю характеризується теплоутилізаційна установка з поверхневими калориферами, яка має найбільший потік утилізованої теплоти та найменші експлуатаційні і зведені витрати. Далі за цим показником розташовується екологічно чиста теплоутилізаційна установка, а установка з КТАНом –утилізатором – КТАНом – повітрянагрівачем – характеризується найнижчою енергетичною ефективністю.

Порівняльні результати розрахунків *екологічної ефективності* теплоутилізаційних установок наведені в табл. 3.

Як показали розрахунки, найбільшою екологічною ефективністю характеризується теплоутилізаційна установка з поверхневими калориферами, інші дві установки мають однакові екологічні показники, які у 2 рази нижчі за калориферну установку.

Таблиця 3 – Результати розрахунків екологічної ефективності

Найменування величини	Позначення	Одиниця	Значення величини для теплоутилізаційних установок		
			КТАН-утилізатор- КТАН- повітрянагрівач	Екологічно чиста установка	Поверхневий калорифер
1.Викидання оксидів азоту без зволоження повітря	M_{NO_x}	г/с	0,23	0,23	0,23
2.Вологовміст суміші повітря	$d_{см}$	г/кг с.п.	40	40	85
3.Кількість надлишкової водяної пари	W_x	кг/кг газу	0,564	0,564	1,2
4.Викидання оксидів азоту при зволоженні повітря	M'_{NO_x}	г/с	0,12	0,12	0,06
5.Відношення M'_{NO_x}/M_{NO_x}	-	-	1,9	1,9	3,8

Висновки

1. Проаналізовані схеми трьох теплоутилізаційних установок димових газів котельні зі зволоженням дуттьового повітря: з КТАНом-утилізатором – КТАНом-повітрянагрівачем, екологічно чиста установка, з поверхневими утилізаторами-калориферами.
2. Розроблені методики і виконані практичні розрахунки енергетичної і екологічної ефективності установок.
3. В результаті порівняння отриманих результатів виявлено, що теплоутилізаційна установка з поверхневими калориферами характеризується найвищими показниками енергетичної і екологічної ефективності.

Список використаної літератури

1. Боженко М.Ф. Підвищення ефективності утилізаторів теплоти димових газів котельні за рахунок зволоження дуттьового повітря / М.Ф.Боженко, І.Я.Перевьорткіна // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. - № 1 (47). – С. 51 – 57.
2. Семенюк Л.Г. Получение конденсата при глубоком охлаждении продуктов сгорания / Л.Г. Семенюк // Промышленная энергетика. – 1987. – № 8. – С. 47–50.
3. Безлюдный П.П. Определение температуры точки росы продуктов сгорания природного газа / П.П. Безлюдный, Л.Г. Семенюк, В.Н.Николаев и др. // Изв. вузов «Энергетика». – 1986. - № 12. – С. 89 - 90.
4. Боженко М.Ф. Энергобережения в теплоснабжении : навч. посіб. / М.Ф. Боженко, В.П. Сало. – К. : НТУУ «КПІ», 2008. – 268 с.
5. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках / А.А.Кудинов. – Ульяновск: УлГПУ, 2000. – 139 с.
6. Боженко М.Ф. Підвищення енергетичної та екологічної ефективності поверхневих теплоутилізаторів димових газів водогрійних котельні / М.Ф.Боженко, О.В. Озеруга // Наукові вісті НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – 2020. - № 1. – С. 7- 14.
7. Семенюк Л.Г. Схемы теплоутилизационных установок контактного типа /Л.Г.Семенюк, А.А.Михайлов, А.А.Гергалов // Промышленная энергетика. – 1983. - № 2. – С. 40 - 43.
8. Семенюк Л.Г. Комплексная система утилизации тепла уходящих газов котлов / Л.Г.Семенюк, А.А.Михайлов, О.П.Шипилов и др. // Промышленная энергетика. – 1991. – № 2. С. 37 - 40.
9. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И.З. Аронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Недра, 1990. – 280 с.

M. Bozhenko, PhD, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2649-0901
O. Ozeruha, Master's student, **ORCID** 0000-0002-8160-3174
National Technical University of Ukraine
«Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky»

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF UTILIZATION INSTALLATIONS OF FLUE GASES OF BOILERS WITH HUMIDIFICATION OF AIR

Reduction of natural gas consumption in industrial and municipal heat power engineering in particular industrial CHP's (combined heat and power plant) and boilers plants can be achieved by increasing its utilization rate. It is known that the smoke gas temperature in the outlet of many steam and hot water boilers exceeds 140 °C, which is also characterized by increased heat loss with flue gases and low efficiency of these units. The use of utilization installations of flue gases for deep cooling of combustion products below the dew point temperature will increase their efficiency and in general increase the COP (coefficient of performance) of the boiler and reduce the consumption of natural gas. Condensing contact mixing heat exchangers or film heat exchangers or surface heat exchangers can be used for these purposes. In last years the requirements to the operation of boilers are increasing for reducing emissions of nitrogen oxides that are harmful to the environment. One of the effective methods of reducing nitrogen oxides is humidification of air, for example, in contact air heaters. The methods and results of calculations of energy and ecological efficiency of heat utilization installations with KTAN (contact heat exchanger with active header) utilizer and KTAN air heater, ecologically clean installation and surface utilizers-heaters are given in the work. Calculations were performed for units installed in a water-heating boiler house in Kyiv with a KVGM-10 (water-heating boiler that burns gas and fuel-oil) water-heating boiler. It is shown that the surface utilize heater unit is characterized by the highest indicators of energy and environmental efficiency. It has the highest power of utilized heat (2312 kW) and the lowest operating and consolidated costs (25950 and 119140 UAH / year, respectively), as well as the lowest emissions of nitrogen oxides with flue gases (0.06 g / s). Further on these indicators there is the ecologically pure heat utilization installation, and the installation with KTAN-utilizer - KTAN

- air heater is characterized by the lowest ecological and energy efficiency and at the same time ecologically pure installation has the same ecological efficiency.

Keywords: boiler house, flue gases, air, temperature, heat utilizer, heat flow, energy and ecological efficiency, consolidated costs.

REFERENCES

1. M.F.Bozhenko , I. Y. Perevertkina, "Improving the efficiency of waste heat utilizers for flue gases from boiler houses due to the moistening of the blowing air", Energy: Economics, technology, ecology, no. 1 (47), pp. 51-57, 2017.. - № 1 (47). - P. 51- 57.
2. Semenyuk L.G. Getting of condensate cooling of products at deeply combustion / L.G. Semeniuk // Industrial energy. - 1987. - № 8. - P. 47-50.
3. Bezlyudniy P.P. Determination of dew point temperature of products of natural gas combustion / P.P. Bezlyudniy, L.G.Semenyuk, V.N.Nykolaev etc. // Izv. high schools "Energetika". - 1986. - № 12. - P. 89-90.
4. Bozhenko M.F. Energy saving in heat supply: teach. guidances. / M.F. Bozhenko, V.P. Salo. - K: NTU "KPI", 2008. - 268 p.
5. Kudynov A.A. Energy saving in thermal generating plants. / A.A.Kudynov. - Ulyanovsk: UIHPU, 2000. - 139 p.
6. Bozhenko M.F. Enhancing the energy and environmental efficiency of surface heat exhauster of smoke gases of water boiler houses / M.F.Bozhenko, O.V. Ozeruha // Scientific news NTU "KPI". – 2020. - № 1. – P. 7-14.
7. Semenyuk L.G. Contact type heat recovery systems / Semenyuk L.G., Mykhailov A.A., Gergalov A.A. // Industrial energy. – 1983. - № 2. – P. 40 - 43.
8. Semenyuk L.G. Integrated heat recovery system for flue gases from boilers / Semenyuk L.G., Mykhailov A.A., Shipilov O.P. etc // Industrial energy. – 1991. – № 2. P. 37 - 40.
9. Aronov Y.Z. Contacting heating of water by products of combustion of natural gas / Y.Z. Aronov. - 2nd ed., Rev. and additional. - L., Nedra, 1990. - 280 p.

УДК 620.9:697.32

М.Ф. Боженко, доцент, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-2649-0901
А.В. Озеруга, магистрант, ORCID 0000-0002-8160-3174
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УТИЛИЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК ДЫМОВЫХ ГАЗОВ КОТЕЛЬНЫХ С УВЛАЖНЕНИЕМ ДУТЬЕВОГО ВОЗДУХА

Приведены методики и результаты расчетов энергетической и экологической эффективности теплоутилизационных установок с КТАНом-утилизатором – КТАНом-воздухоподогревателем, экологически чистой установки, с поверхностными утилизаторами-калориферами. Расчеты выполнены для теплоутилизационных установок, установленных в отопительной водогрейной котельной в г. Киеве за водогрейным котлом КВ-ГМ-10. Показано, что теплоутилизационная установка с поверхностными калориферами характеризуется наибольшими показателями энергетической и экологической эффективности. что теплоутилизационная установка с поверхностными калориферами характеризуется наибольшими

Ключевые слова: котельная, дымовые газы, воздух, температура, теплоутилизатор, тепловой поток, энергетическая и экологическая эффективность, капиталовложения, приведенные затраты.

Надійшла 27.08.2020

Received 27.08.2020

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

D. Naumenko, master's student

T. Hrebeniuk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.; ORCID 0000-0002-9287-2919

O. Zakladnyi, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692

V. Bronytskyi, TF, ORCID 0000-0001-6882-2295

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ANALYSIS OF USE OF TRAPA NATANS AS ALTERNATIVE FUEL FOR BOILER

The article considers the search for alternative fuel relevant for the present question. For example, the use of wood pellets or biomass. The use of biofuels can also put a stop to the biggest environmental problem - climate change on the planet. Biofuels have less effect on the greenhouse effect, because plants that then use as biofuels absorb carbon from the atmosphere and produce oxygen. The properties of Trapa natans spread and multiply rapidly, make it possible to consider it as an alternative fuel for boiler houses of the hot water supply system (HWS). Coal combustion is usually characterized by high combustion temperatures and contains more sulfur and nitrogen than wood and other biomass. This means that the burning of coal leads to the release of sulfur oxide and nitrogen oxides, as well as toxic pollutants that are bound by adsorption or absorption. Wood combustion smoke also contains gaseous air pollutants, which may have a number of adverse health effects. Among these gases are carbon monoxide, nitric oxide, acrolein, formaldehyde, benzene, and other organic compounds, including carboxylic acids, numerous saturated and unsaturated hydrocarbons, aromatic compounds, and oxygen organic compounds. Combustion of biomass, which, for example, as a result of salt water treatment or transport by sea, contains chlorine, can also lead to emissions of chloro-organic compounds. To establish a connection between the combustion heat and the calorific value of the substance, the equations of the chemical combustion reaction are analyzed. The calorific value of the fuel is calculated using the empirical formula proposed by D.I. Mendeleev. To do this, an analysis of the elementary composition of the fuel is performed, that is, the percentage of oxygen, hydrogen, carbon, sulfur, nitrogen, ash, water in it. The necessary amount of Trapa natans, firewood and coal required to heat 500 liters of water from 30 to 100 °C has been established. It has been proved that Trapa natans can be used as an alternative fuel for boiler systems of HWS for enterprises adjacent to reservoirs.

Keywords: *Trapa natans, water nut, alternative fuel, boiler houses, hot water supply systems, heat of combustion.*

Introduction

Every year, fossil fuel prices are rising, and their number is decreasing. Humanity has long been in search of alternative fuel. For example, the use of wood pellets or biomass. The use of biofuels can also put a stop to the biggest environmental problem - climate change on the planet. Biofuels have less effect on the greenhouse effect, because plants that then use as biofuels absorb carbon from the atmosphere and produce oxygen.

The properties of Trapa natans (Slingshot floating, teal, damn nut, water chestnut) spread and multiply rapidly, as well as its chemical composition, make it possible to consider it as an alternative fuel for boiler systems of hot water supply (HWS).

Goal and tasks

The purpose of the work is due to the need of mankind for alternative fuels, because the amount of natural fossil fuels is decreasing, and its use increases the amount of greenhouse gases, giving rise to the greatest environmental problem of the modern world.

Presentation of the main research material

The introduction of new renewable energy technologies and the search for alternative fuels is an effective way to overcome fuel and environmental problems.

The usefulness of fuels depends on many factors. Coal is usually characterized by high combustion temperatures and contains more sulfur and nitrogen than wood and other biomass. This means that combustion of coal leads to the release of SO_2 and nitrogen oxides (NO_x) (4% emissions SO_2 and 1% emissions NO_x worldwide)

as well as toxic pollutants that bind to PM (suspended solids). The situation is complicated by the fact that coal that is mined in certain geographical regions contains toxic elements such as fluorine, arsenic, selenium, mercury and lead. The combustion of such coal has been associated with poisoning with toxic compounds released by combustion [1].

$PM_{2.5}$ (suspended solid particles with aerodynamic diameter less than 2.5 μm) is one of the main air pollutants generated during combustion of solid fuels. Fine particles originating from wood burning are generally considered to be the best indicator of health effects; this pollutant is the most widely studied and the focus of most emission regulations.

Black carbon (BC) is one of the components of $PM_{2.5}$, which has a negative impact on health and is recognized as a short-lived pollutant that affects the climate [2]. As emissions from wood furnaces or devices for burning long wood floors cool or "aging," the BC adsorbs a number of gaseous hydrocarbons. When properly operated to optimize airflow, wood pellet furnaces emit much less BC and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) than conventional wood furnaces [3].

Organic carbon (OC) is another component of PM that is directly emitted into the air when many solid fuels burn, and is also formed as a secondary pollutant. Organic and some inorganic emissions undergo rapid physicochemical transformation, followed by later reactions in the atmosphere [4]. The speed of many reactions depends on solar lighting (ultraviolet radiation), as well as on atmospheric temperature; this means that during the cold and dark periods of the heating season they flow much slower than in other, sunnier and warmer periods of the year. Unlike BC, aerosols containing OC tend to have a cooling effect on the climate. When small heaters are used, even an increase in combustion efficiency will practically not affect the level of BC emissions when burning a certain amount of fuel. However, more complete combustion will significantly reduce emissions of organic compounds and increase emissions of inorganic salts such as potassium and zinc sulphates, chlorides and carbonates, the composition of which depends on the type of biomass [5].

Smoke from wood (and other biomass) combustion also contains gaseous air pollutants, which may have a number of adverse health effects. Among these gases: CO , NO_x), cellular organic compounds (acrolein, formaldehyde, benzene), gaseous and suspended PAHs, as well as other organic compounds including carboxylic acids, numerous saturated and unsaturated hydrocarbons, aromatic compounds and oxygen organic compounds (aldehyde). From biomass combustion, which, for example, as a result of salt water treatment or transport by sea, contains chlorine, can also lead to emissions of chloro-organic compounds. Combustion of coal is often accompanied by emission of SO_2 due to possible high sulphur content in this type of fuel [6].

Levoglucosan is a biomass combustion marker that is often used as an indicator to determine exposure to biomass-based fuel combustion products or to investigate source distribution. While the benefit of Levoglucosan as a marker of biomass combustion has already been proven, more research is needed to quantify the relationship between Levoglucosan levels and mass PM concentration in scenarios involving different types of wood and devices for its combustion [7].

When burning coal, elements and compounds that are particularly dangerous to human health can be released (fluorine, arsenic, selenium, mercury and lead); Household coal combustion can lead to the release of these pollutants into the indoor environment [6]. In a particularly difficult economic situation, people often resort to burning fragments of furniture, plastic and garbage. The combustion of these materials is accompanied by the release of highly harmful pollutants such as dioxins and lead.

The short-term effects of wood combustion particles and fossil fuel combustion particles are equally harmful to health. In animal experiments, 28 toxic contaminants, including 14 carcinogenic compounds and 4 cancer promoting agents, were proved to be present in the smoke from solid fuel combustion [8].

The association between increases in atmospheric daily concentrations of $PM_{2.5}$ and increases in mortality and hospitalization has been demonstrated in hundreds of epidemiological time series studies conducted in different climatic conditions and populations. Long-term exposure (years) to PM appears to have a greater impact on health than short-term (days), although it should be considered that there have been fewer studies of long-term exposure. The results of the studies suggest that the influence of PM not only causes acute manifestations of the disease, but can also accelerate the development of chronic diseases or even cause them [9]. In low-income countries, the long-term impact of high concentrations of pollutants in wood smoke was associated with lower respiratory tract infections (including pneumonia) in children, chronic obstructive pulmonary disease, decreased lung function and lung cancer in women, and stillborn and low birth weight [1].

For enterprises adjacent to the reservoirs, it is possible to consider *Trapa natans* as an alternative fuel for hot water boiler systems. *Trapa natans* is a one-year-old plant with a flexible stem 50-500 cm long, its floating leaves form a rosette with a diameter of up to 30 cm. The placement of rhombic leaf plates is mosaic. The flowers are single, surface, have four white petals. The upper parts of the calyx of the flower remain with the fruits, wooden and turn into spikes. The fruits are bone-shaped, have the appearance of four horns with a diameter of 2-5 cm [10]. The infancy root *Trapa natans*, unlike the root of all other plants, begins to grow not down, but up and only after the appearance of the stem bends with an arc and attaches to the soil. *Trapa natans* belongs to the group of hydrophytes

rooted with leaves floating on water, which are characterized by a large amount of carbon and nitrogen and a low concentration of unstructured carbohydrates, mineral substances and organic acids [11].

When burning Trapa natans, carbon dioxide, nitrogen and ash are released, but in a smaller amount than when burning other fuels. Nitric oxide NO and nitrogen dioxide N_2O in the atmosphere are found together, so they are most often evaluated for their joint effect on the human body. Only near the emission source there is a high concentration of NO . During combustion of fuel in cars and thermal power plants, approximately 90% of nitrogen oxides are formed in the form of nitrogen monoxide. The remaining 10% is nitrogen dioxide. However, during chemical reactions, a significant part of NO is converted to N_2O , a much more dangerous compound. Nitrogen monoxide NO is a colorless gas. It does not irritate the airway, and therefore a person may not feel it. When inhaled, NO , like CO , binds to hemoglobin. At the same time, unstable nitroso-connected is formed, which quickly goes into methemoglobin, while Fe^{2+} goes into Fe^{3+} . The Fe^{3+} ion cannot bind O_2 back and thus leaves the oxygen transfer process. The concentration of methemoglobin in the blood is 60-70 % considered lethal. But such a limit value can occur only in closed rooms, and in the open air it is impossible [12].

To calculate the amount of Trapa natans for heating water, the empirical formula of D.I. Mendeleev is considered.

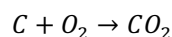
Chemical reactions are accompanied by heat release or absorption, and the combustion reaction is always accompanied by heat release.

The combustion heat Q_g (J / mol) is the amount of heat generated by the complete combustion of one mole of matter and the conversion of the combustible matter into complete combustion products. In technical calculations, the calorific value of the fuel Q (J/kg or J/m³) is more often used not the combustion heat Q_g .

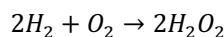
Knowledge of the combustion heat and calorific value of the fuel is necessary to calculate the combustion or explosion temperature, explosion pressure, flame propagation rate and other characteristics. The calorific value of the fuel is determined either by experimental or calculated methods.

To establish a connection between the combustion heat and the calorific value of the substance, it is necessary to write down the equation of the chemical combustion reaction.

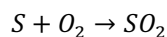
The product of complete carbon combustion is carbon dioxide:



The product of complete hydrogen combustion is water:



The product of complete sulfur combustion is sulfur dioxide:



At the same time, nitrogen, halides and other incombustible elements are released in free form.

If the calorific value of the fuel is unknown, then it can be calculated using the empirical formula proposed by D. I. Mendeleev. To do this, you need to know the elementary composition of the fuel (equivalent fuel formula), that is, the percentage of the following elements in it:

- oxygen (O);
- hydrogen (H);
- carbon (C);
- sulfur (S);
- nitrogen (N);
- ash (A);
- water (W).

Fuel combustion products always contain water vapors, which are formed both due to the presence of moisture in the fuel and during hydrogen combustion. Spent combustion products leave industrial plant at temperature higher than dew point temperature. Therefore, the heat generated by condensation of water vapor cannot be usefully used and should not be taken into account in thermal calculations.

For calculation, a lower calorific value Q_n of the fuel is usually used, which takes into account heat losses with water vapors. For solid and liquid fuels, the value of Q_n (MJ/kg) is approximately determined by the Mendeleev formula:

$$Q_n = 0,339[C] + 1,025[H] + 0,1085[S] - 0,1085[O] - 0,025[W], \quad (1)$$

where the percentage (%) of the corresponding elements in the fuel composition is indicated in parentheses.

This formula takes into account the heat of exothermic reactions of carbon, hydrogen and sulfur combustion (with a plus sign). Oxygen included in the fuel partially replaces air oxygen, so the corresponding term in formula (1) is taken with the sign "minus." When moisture evaporates, heat is consumed, so the corresponding term containing W is also taken with the sign "minus" [13].

The solution is to provide alternative fuel to enterprises located near reservoirs.

To do this, it is necessary to determine the amount of Trapa natans needed to heat 500 liters of water from 30 to 100 °C, if 5% of the heat generated during combustion is consumed for heating, and the heat capacity of water $c = 1 \text{ kcal (kg} \cdot \text{deg)}$ or $4.1868 \text{ kJ (kg} \cdot \text{deg)}$. The composition of Trapa natans is examined according to the above elements, as shown in Fig. 1 [14].

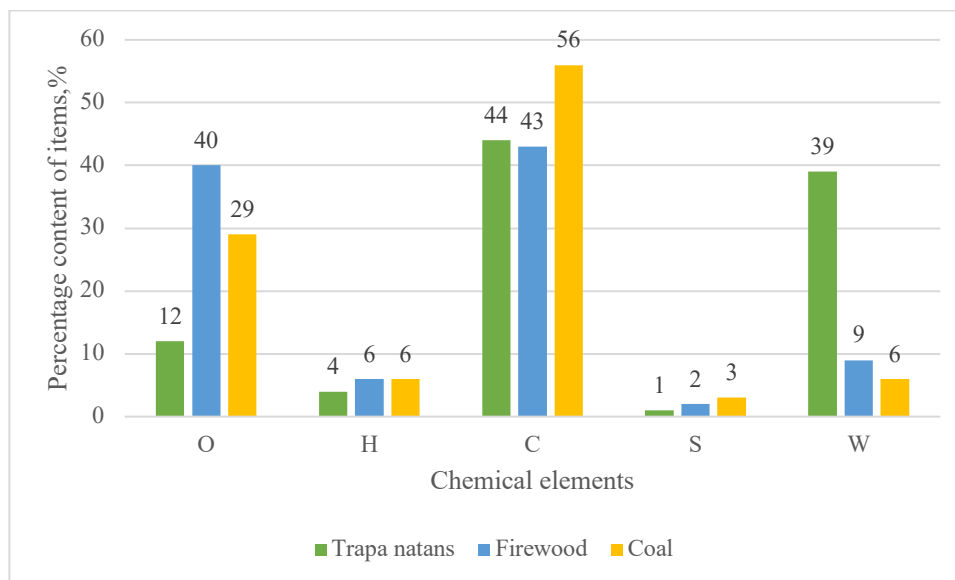


Figure 1 – Elemental composition of Trapa natans, firewood and coal

Determine the amount of heat required to heat $m = 500 \text{ kg}$ of water:

$$Q_1 = c \cdot m \cdot \Delta T = 4,1868 \cdot 500 \cdot (100 - 30) = 146,538 \text{ MJ}. \quad (2)$$

We will find the calorific value of Trapa natans according to the Mendeleev formula (1):

$$Q_n = 0,339 \cdot 44 + 1,025 \cdot 4 + 0,1085 \cdot 1 - 0,1085 \cdot 12 - 0,025 \cdot 39 = 16,847 \text{ MJ/kg}. \quad (3)$$

So, the amount of heat spent on heating water during combustion of 1 kg of Trapa natans (taking into account that 5% of the heat ($a = 0,05$) released during combustion is used for its heating):

$$Q_2 = a \cdot Q_n = 0,05 \cdot 16,847 = 0,842 \text{ MJ/kg}. \quad (4)$$

At the same time, the amount of Trapa natans required to heat 500 liters of water from 30 to 100 °C:

$$M = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{146,538}{0,842} = 174,04 \text{ kg}. \quad (5)$$

Thus, 174 kg of Trapa natans is required to heat water in the boiler HWS.

To draw the necessary conclusions, we compare fuels such as water nut, firewood and coal. To do this, the necessary calculations were made for the same conditions, only for other fuels.

The mean values of firewood composition were studied and presented in Fig. 1 [15]. Using these values, we will find the calorific value of firewood according to the Mendeleev formula (1):

$$Q_n = 0,339 \cdot 43 + 1,025 \cdot 6 + 0,1085 \cdot 2 - 0,1085 \cdot 40 - 0,025 \cdot 9 = 16,379 \text{ MJ/kg}. \quad (6)$$

At the same time, the amount of heat spent on heating water during combustion of 1 kg of firewood (taking into account that 5% of heat ($a = 0,05$) released during combustion is used for its heating):

$$Q_2 = a \cdot Q_n = 0,05 \cdot 16,379 = 0,818 \text{ MJ/kg.} \quad (7)$$

We determine the required amount of firewood required for heating 500 liters of water from 30 to 100 °C:

$$M = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{146,538}{0,818} = 179,14 \text{ kg.} \quad (8)$$

179.14 kg of firewood is required to heat water in HWS.

Coal composition is investigated and is presented in Fig. 1 [15]. We use these values to find the calorific value of coal according to the Mendeleev formula (1):

$$Q_n = 0,339 \cdot 56 + 1,025 \cdot 6 + 0,1085 \cdot 3 - 0,1085 \cdot 29 - 0,025 \cdot 6 = 22,163 \text{ MJ/kg.} \quad (9)$$

Under these conditions, the amount of heat spent on heating water during combustion of 1 kg of coal (taking into account the fact that 5% of the heat ($a = 0,05$) released during combustion is used for its heating):

$$Q_2 = a \cdot Q_n = 0,05 \cdot 22,163 = 1,108 \text{ MJ/kg.} \quad (10)$$

So we find the required amount of coal needed to heat 500 liters of water from 30 to 100 °C:

$$M = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{146,538}{1,108} = 132,25 \text{ kg.} \quad (11)$$

To heat water in the boiler HWS, 132.25 kg of coal is needed.

The technology of underground coal mining in Ukraine is inherently quite costly. The problem of high cost and poor quality of domestic coal negatively affects the economic and environmental performance of enterprises. It is clear that plant biomass cannot compete with traditional hydrocarbon fuels in terms of energy efficiency, but even their partial substitution allows improving the economic and environmental situation in the country. However, a number of factors hinder the widespread introduction of plant biomass into thermal energy. Consequently, there is a need to reduce the costs of traditional fossil fuels and to reduce harmful emissions to the environment through the use of plant biomass as a renewable energy source. And first of all, enterprises that are adjacent to reservoirs with an active growth of water nut.

Conclusions

The article investigated that the slingshot can be used as fuel for boiler systems of the HWS. Chemical combustion equations were analyzed to establish a connection between the combustion heat and the calorific value of the substance. We determine the required amount of *Trapa natans* required to heat 500 liters of water from 30 to 100 °C, which turned out to be less than the amount of firewood by 5.1 kg.

Using empirical dependence, the calorific value of *Trapa natans* was established. It has been proven that this plant can be used as an alternative fuel for boiler houses of the HWS for enterprises adjacent to reservoirs.

REFERENCES

1. WHO guidelines for indoor air quality. Fuel combustion in households [Electronic resource] // WHO. - 2014. - Mode of access to the resource: <http://www.who.int>
2. Bond T.C. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment / Bond T.C. // *J Geophys Res Atmos*. 2013. №118. Pp. 5380–5552.
3. Eriksson A.C. Particulate PAH emissions from residential biomass combustion: time-resolved analysis with aerosol mass spectrometry / Eriksson A.C. // *Environ Sci Technol*. - 2014. - №48. - P. 7143–7150.
4. Kocbach Bølling A. Health effects of residential wood smoke particles: the importance of combustion conditions and physicochemical particle properties / Kocbach Bølling A. // *Part Fiber Toxicol*. - 2015. - P. 6–29.
5. Larson T. Wood smoke: emissions and noncancer respiratory effects / Larson T. // *Annu Rev Public Health*. - 2012. - №15. - P. 133–156.
6. Barreca A. Coal, smoke, and death: bituminous coal and American home heating [Electronic resource] / Barreca A. // Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. - 2014. - Resource access mode: <http://www.nber.org>.
7. Mazzoleni L.R. Emissions of levoglucosan, methoxy phenols, and organic acids from prescribed burns, laboratory combustion of wildland fuels, and residential wood combustion / Mazzoleni L.R. // *Environ Sci Technol*. - 2017. - №41. - P. 2115–2122.

8. Smith K. Millions dead: how do we know and what does it mean? Methods used in the comparative risk assessment of household air pollution. / Smith K. // Annu Rev Public Health. - 2014. - №35. - P. 185–206.
9. Loomis D. The carcinogenicity of outdoor air pollution. / Loomis D. // Lancet Oncol. - 2013. - №14. - P. 1262–1263.
10. Hrebenuk TV, Naumenko DP The water caltrop impact on the ecological status and reservoirs in Ukraine. Humanities space of science: experience and perspectives. - 2020. - №27. - P. 33-35.
11. Naumenko DP, Hrebenuk TV Study of the influence of Trapa natans on the state of the aquatic environment of the Irsha river. Energy. Ecology. Man. - 2020. - №12. - P. 347-350.
12. Goldovskaya LF Influence of nitrogen oxides on the human and plant body / Goldovskaya LF // Environmental Chemistry: A Textbook for Universities. - 2015. - P. 158–165.
13. Petrikeeva NA Use of full heat of combustion of fuel in boiler installations / Petrikeeva NA // Scientific journal. Engineering systems. - 2014. - P. 211–237.
14. Hrebenuk TV, Bronytsky VO, Naumenko DP ANALYSIS OF NEGATIVE FACTS OF EXISTENCE IN WATER FACILITIES OF UKRAINE TRAPA NATANS. Perspectives of world science and education. - 2020. - №9. - P. 55-60.
15. Lyrshchikov S.Yu. Types of fuel for solid fuel boilers / Lyrshchikov S.Yu. // Chemistry in the interests of sustainable development. - 2015. - P. 111–115.

УДК 628.4+504.062

Д.П. Науменко, магістр
Т.В. Гребенюк, канд. техн. наук, доцент, **ORCID 0000-0002-9287-2919**
О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент, **ORCID 0000-0003-2813-3692**
В.О. Броницький, асистент, **ORCID0000-0001-6882-2295**
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ TRAPA NATANS ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА ДЛЯ КОТЕЛЕНЬ

В статті розглянуто актуальне для сьогодення питання пошук альтернативного палива. Як приклад, використання деревних пелет або біомаси. Використання біопалива також може призупинити найбільшу екологічну проблему – зміну клімату планети. Біопаливо має менший вплив на парниковий ефект, адже рослини, які потім використовують, як біопаливо, поглинають вуглець з атмосфери та виробляють кисень. Властивості Trapa natans швидко розповсюджуватися та розмножуватися, дають можливість розглядати його як альтернативне паливо для котельнь системи гарячого водопостачання (ГВП). Спалювання вугілля зазвичай характеризується високими температурами горіння і містить більше сірки та азоту, ніж деревина та інші види біомаси. Це означає, що спалювання вугілля призводить до виділення оксиду сірки і оксидів азоту, а також токсичних забруднювачів, які зв'язуються шляхом адсорбції або поглинання. Дим при спалюванні деревини містить також газоподібні забруднювачі повітря, з якими може бути пов'язаний ряд несприятливих наслідків для здоров'я. Серед цих газів: оксид вуглецю, оксид азота, акролеїн, формальдегід, бензол, та інші органічні сполуки, включаючи карбонові кислоти, численні насичені і ненасичені вуглеводні, ароматичні з'єднання і кисень органічні сполуки. Від згорання біомаси, яка, наприклад, в результаті обробки солоною водою або транспортування по морю містить хлор, може призводити також до викидів хлорвмісних органічних сполук. Для встановлення зв'язку між теплотою згорання і теплотворною здатністю речовини проаналізовані рівняння хімічної реакції горіння. Розрахована теплотворна здатність палива за допомогою емпіричної формули, запропонованої Д.І. Менделєєвим. Для цього виконано аналіз елементарного складу палива, тобто процентний вміст в ньому кисню, водню, вуглецю, сірки, азоту, золи, води. Встановлена необхідна кількість Trapa natans, дров та вугілля, необхідних для нагрівання 500 літрів води від 30 до 100 °С. Доведено, що Trapa natans можна використовувати як альтернативне паливо для котельнь системи ГВП для підприємств прилеглих до водосховищ.

Ключові слова: Trapa natans, водяний горіх, альтернативне паливо, котельні, системи гарячого водопостачання, теплота згорання.

Список використаної літератури

1. Керівні принципи ВООЗ за якістю повітря в приміщеннях. Спалювання палива в домашніх господарствах [Електронний ресурс] // ВООЗ. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.who.int>
2. Bond T.C. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment / Bond T.C. // J Geophys Res Atmos. 2013. №118. С. 5380–5552.

3. Eriksson A.C. Particulate PAH emissions from residential biomass combustion: time-resolved analysis with aerosol mass spectrometry / Eriksson A.C. // *Environ Sci Technol.* – 2014. – №48. – С. 7143–7150.
4. Kocbach Bølling A. Health effects of residential wood smoke particles: the importance of combustion conditions and physicochemical particle properties / Kocbach Bølling A. // *Part Fibre Toxicol.* – 2015. – С. 6–29.
5. Larson T. Wood smoke: emissions and noncancer respiratory effects / Larson T. // *Annu Rev Public Health.* – 2012. – №15. – С. 133–156.
6. Barreca A. Coal, smoke, and death: bituminous coal and American home heating [Електронний ресурс] / Barreca A. // Cambridge, MA: *National Bureau of Economic Research.* – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.nber.org>.
7. Mazzoleni L.R. Emissions of levoglucosan, methoxy phenols, and organic acids from prescribed burns, laboratory combustion of wildland fuels, and residential wood combustion / Mazzoleni L.R. // *Environ Sci Technol.* – 2017. – №41. – С. 2115–2122.
8. Smith K. Millions dead: how do we know and what does it mean? Methods used in the comparative risk assessment of household air pollution. / Smith K. // *Annu Rev Public Health.* – 2014. – №35. – С. 185–206.
9. Loomis D. The carcinogenicity of outdoor air pollution. / Loomis D. // *Lancet Oncol.* – 2013. – №14. – С. 1262–1263.
10. Гребенюк Т.В., Науменко Д.П. The water caltrop impact on the ecological status of reservoirs in Ukraine. *Гуманітарний простір науки: досвід і перспективи.* – 2020. – №27. – С. 33-35.
11. Науменко Д.П., Гребенюк Т.В. Дослідження впливу Трапа natans на стан водного середовища річки Ірша. *Енергетика. Екологія. Людина.* – 2020. – №12. – С. 347-350.
12. Голдовская Л.Ф. Воздействие оксидов азота на организм человека и растения / Голдовская Л.Ф. // *Химия окружающей среды: Учебник для вузов.* – 2015. – С. 158–165.
13. Петрикеева Н.А. Использование полной теплоты сгорания топлива в котельных установках / Петрикеева Н.А. // *Научный журнал. Инженерные системы.* – 2014. – С. 211–237.
14. Hrebenuk T.V., Bronytsky V.O., Naumenko D.P. ANALYSIS OF NEGATIVE FACTS OF EXISTENCE IN WATER FACILITIES OF UKRAINE TRAPA NATANS. *Perspectives of world science and education.* – 2020. – №9. – С. 55-60.
15. Лырщиков С.Ю. Виды топлива для твердотопливных котлов / Лырщиков С.Ю. // *Химия в интересах устойчивого развития.* – 2015. – С. 111–115.

Надійшла 21.08.2020
Received 21.08.2020

Т.В. Дикун, ст. викл., ORCID 0000-0002-9848-4343

Л.І. Гаєва, канд. хім. наук, доц., ORCID 0000-0003-4948-845X

Ф.В. Козак, канд. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-9147-883X

Я.М. Дем'янчук, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-2005-2986

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

АНАЛІЗ РОБОТИ АВТОТРАНСПОРТУ НА БІОГАЗІ В ГІРСЬКИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Актуальність проблеми ефективного використання традиційних джерел енергії і пошук альтернативних ресурсів не викликає сумніву. На сьогодні в Україні майже не використовується потенціал низькокалорійних газів, що у значній кількості виробляються сільським господарством та промисловістю, зокрема біогазу. Кількість існуючих вітчизняних установок з утилізації цього газу є незначним, хоча у більшості розвинених країнах налічується сотні і тисячі таких установок. Одним з перспективних джерел енергії є біогаз сміттєзвалищ, який на сьогодні викидається в атмосферу і забруднює її, або спалюється у факельних установках. Малорозвиненим напрямком використання біогазу – використання його в якості палива в автомобільних двигунах внутрішнього згорання. Однак заміна бензину на біогаз призводить до зменшення потужності двигунів та до збільшення витрати палива. Особливо це слід враховувати при експлуатації автомобілів в гірській місцевості – при зменшенні атмосферного тиску та температури. Знаючи компонентний склад біогазу можна розрахувати його теплоту згорання та теплоту згорання газоповітряних сумішей. В результаті аналітичних досліджень отримано графічні залежності зміни ефективної потужності і ефективної питомої витрати біогазу від зміни температури та зміни атмосферного тиску доквілля.

Ключові слова: біогаз, ефективність, теплота згорання, атмосферний тиск, температура, потужність, питома витрата.

Вступ. Біогаз – газ, який утворюється при мікробіологічному розкладанні органічних відходів на сміттєзвалищах, болотах, каналізаційних системах, тощо.

На сьогоднішній день частка відновлювальних джерел енергії в світовому енергетичному балансі незначна – близько 14 %, а внесок біомаси – 1,2 %. Але, як свідчить практика, навіть незначні коливання на ринках енергетичних ресурсів, призводить до суттєвого підвищення цін на енергоносії. Тому роль альтернативної енергетики на ринках буде тільки зростати. В структурі альтернативної енергетики в світі енергія біомаси становить до 13 %. За прогнозами вчених, частка відновлювальних джерел енергії до 2040 року досягне 47,7 %, а внесок біомаси – 23,8 % [1].

Питанню дослідження впливу гірських умов на показники роботи автомобільних двигунів на біогазі в Україні та світі приділяється дуже мало уваги.

Експлуатація автомобілів на гірських дорогах Карпатського регіону на висотах 1000÷2000 м над рівнем моря з підйомами і спусками до 12 %, протяжністю ділянок до 10÷15 км – є складною.

З підвищенням рівня місцевості над рівнем моря атмосферний тиск, густина повітря і температура знижуються, що погіршує наповнення циліндрів двигуна автомобіля. Внаслідок розрідження повітря і малих швидкостей руху на крутих підйомах інтенсивність охолодження двигуна знижується. Одночасно робота двигунів на Perezбагаченій горючій суміші і рух здебільшого на нижчих передачах призводить до перегрівання двигунів, температура закипання охолоджуючої рідини в гірських умовах знижується.

Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних даних. Згідно даних наведених в [2], залежність між зміною атмосферного тиску та температури доквілля від висоти показана в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні показники доквілля залежно від висоти над рівнем моря

Поз.	Висота, м	Атмосферний тиск, кПа	Температура, °С
1	0	101,3	20
2	1000	89,9	13,5
3	2000	79,5	7
4	3000	70,1	0,5

Мета статті. 1. Проаналізувати можливість і особливості використання біогазу як палива для двигунів внутрішнього згорання в гірських умовах.

2. Дослідити вплив окремих параметрів навколишнього середовища в гірських умовах на роботу двигунів внутрішнього згорання, їх техніко-експлуатаційні показники.

© Т.В. Дикун, Л.І. Гаєва, Ф.В. Козак, Я.М. Дем'янчук, 2020

Іноземний досвід. Біогазові технології розвиваються досить швидкими темпами. За даними журналу «Міжнародна біоенергетика» 80 % біогазового потенціалу міститься в сільськогосподарській сировині і 10÷11 % - в промислових і комунальних відходах. Сьогодні перше місце в Європі за кількістю діючих біогазових установок належить Німеччині – в 2010 р. їх нараховувалося понад 9000. 7 % виробленого цими установками біогазу надходить в газопроводи, решта використовується для потреб виробника. За масштабами застосування біогазу передре Даниї. Даний вид палива забезпечує тут майже 20 % від загального енергоспоживання країни.

У 12 європейських країнах (Австрія, Чехія, Німеччина, Данія, Фінляндія, Швеція, Великобританія, Італія, Ісландія, Угорщина) біометан використовується як моторне поливо (в тому числі у вигляді суміші з природним газом), а також для виробництва тепла [3].

В Україні існують поодинокі приклади застосування біогазових технологій. Кілька біогазових проєктів на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ) в м. Маріуполь, Львів, Кременчук, Луганськ, Київ, а також на Бортницькій станції очищення стічних вод (м. Київ). Проєкт, реалізованих компанією ЛНК на київському полігоні №5 є найбільш успішним – на полігоні працює лінійка з п'яти біогазових двигунів компанії TEDOM з встановленою потужністю 177 кВт. Одним із яскравих прикладів успішної реалізації біогазового проєкту по використанню біогазу для двигунів внутрішнього згоряння є біогазова установка «Полігон ТПВ с. Рибне» поблизу м. Івано-Франківська. Для виробництва біогазу, отриманого із сміттєзвалища, було пробурено 18 свердловин та встановлено дві газодизельні установки потужністю 330 кВт, які використовуються для виробництва електроенергії. Прикладів успішного використання біогазу для автомобільних двигунів внутрішнього згоряння, крім примітивних проєктів фермерських господарств, на жаль в Україні немає.

Біогаз у порівнянні з традиційними паливами володіє наступними перевагами:

- виробляється з біологічної сировини, отже його виробництво і спалювання є частиною природного циклу карбону, що не призводить до накопичення газу в атмосфері і до парникового ефекту. Екологічні збитки від систем збору органічних відходів знижуються. Забезпечується екологічно замкнута енергетична система.

- біогаз – відновлювальне джерело енергії, яке фактично ніколи не вичерпується. Для порівняння, природного газу і нафти при теперішніх темпах їх використання, за прогнозами, вистачить не більше як на 50 років [4].

- біогаз виробляється близько до споживача, сировина для його виробництва теж знаходиться недалеко від заводів і немає необхідності транспортувати газ на великі відстані.

Усереднений компонентний склад біогазу наведений в таблиці 2.

Таблиця 2 – Компонентний склад біогазу

№ п/п	Компонент	Вміст, % об.
1	Метан (CH ₄)	50÷75
2	Діоксид карбону (CO ₂)	25÷50
3	Водень (H ₂)	0÷1,0
4	Сірководень (H ₂ S)	0÷3,0
5	Азот (N ₂)	0÷10,1
6	Кисень (O ₂)	0÷2,0

Наявність є біогазу сірководню є досить негативним фактором, оскільки сірководень вступає в реакцію з більшістю металів і може викликати корозію деталей двигунів внутрішнього згоряння, резервуарів, баків. Тому актуальним є питання очищення біогазу.

Недоліком біогазу порівняно з традиційними автомобільними паливами є мала концентрація енергії від його згоряння, що призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії двигуна, ефективної потужності і збільшення витрати палива.

Знаючи компонентний склад біогазу за формулою Менделєєва можна розрахувати теплоту згоряння біогазу Q_n

$$Q_n = 128 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 234 \cdot H_2S + 339 \cdot CH_4 + 589 \cdot C_nH_m \left[\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right] \quad (1)$$

де $CO, H_2, H_2S, CH_4, C_nH_m$ – вміст у газоподібному паливі окремих компонентів, % об. за нормальних умов (н.у).

Згідно формули (2) проведені розрахунки теплоти згоряння газових сумішей

$$Q_{п.с.} = \frac{Q_n \cdot \eta}{1 + \alpha L_0} \quad (2)$$

де η – коефіцієнт повноти згоряння;

L_0 – теоретично необхідний об'єм повітря для згоряння 1 м³ палива для за н.у.

Розрахунки показують, що для двигуна автомобіля *Opel-Vectra* при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1$ нижча теплота складає: для бензоповітряної суміші – $Q_n = 3739$ кДж/м³, газоповітряної суміші – $Q_n = 3404$ кДж/м³, а біогазоповітряна суміш (при вмісті $CH_4 = 62\%$) – $Q_n = 2168$ кДж/м³.

Зниження питомої теплоти згоряння в порівнянні з стандартним паливом 1 м³ горючої суміші при використанні природного газу CH_4 становить 8,7 %, біогазу – 42,1 %, а при використанні суміші біогазу і 30 % CH_4 – 15,25 %.

Тобто, одним з варіантів покращення показників роботи двигунів внутрішнього згоряння є змішування природного газу з біогазом. Нижча теплота згоряння такої суміші змінюється за графіком, який зображено на рисунку 1.

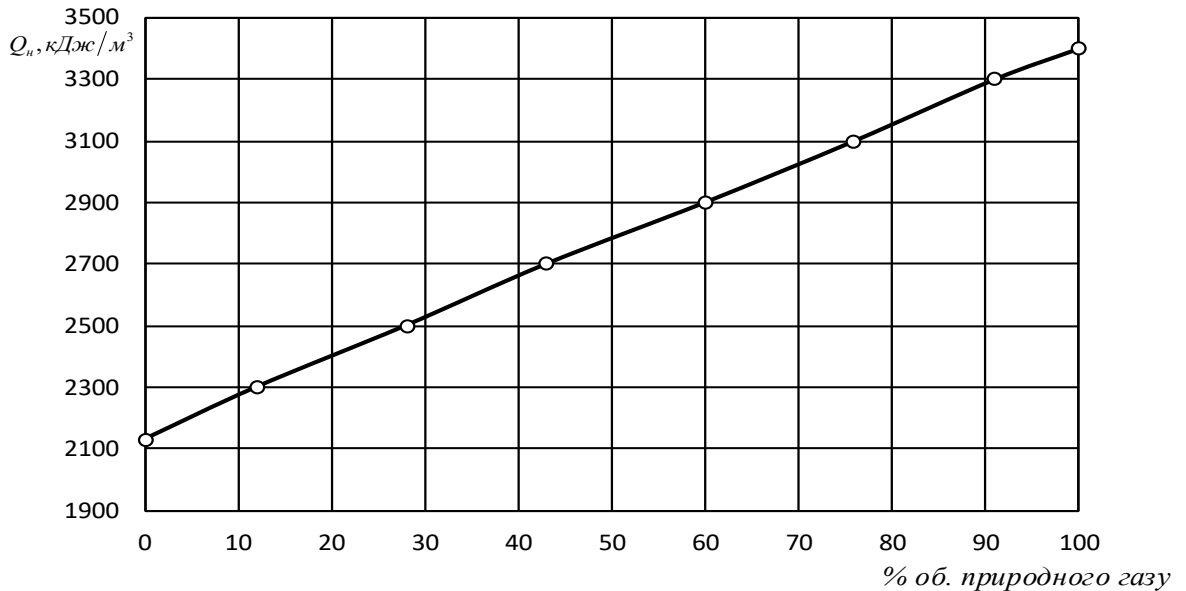


Рисунок 1 – Нижча теплота згоряння газових сумішей CH_4 і біогазу

Основна частина.

Дослідження проводилися на двигуні ЗМЗ-5234 і ЗИЛ-130. Для розрахунків використовувався програмний комплекс розрахунку та оптимізації роботи двигунів внутрішнього згоряння «Дизель-ПК» [6].

Основними техніко-експлуатаційними показниками автомобільних двигунів є ефективна потужність N_e , крутний момент M_k , питома ефективна g_e та годинна G_T витрати палива.

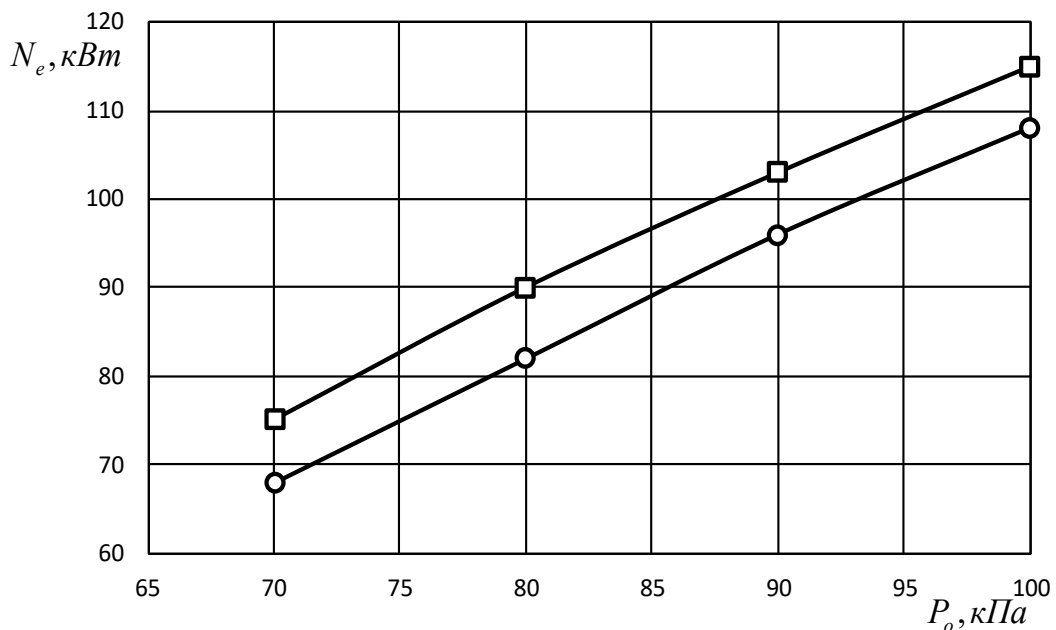


Рисунок 2 – Залежність зміни ефективної потужності двигуна ЗМЗ-5234.10 від атмосферного тиску

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_h \cdot n \cdot i}{30 \cdot \tau}, \text{ кВт} \quad (3)$$

де V_h – робочий об'єм двигуна, л;
 n – число обертів, об/хв;
 i – кількість циліндрів;
 τ – тактність двигуна.

$$M_k = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot N_e}{\pi \cdot n}, \text{ Н·м.} \quad (4)$$

Питома ефективна витрата палива

$$g_e = \frac{G_T}{N_e}, \frac{\text{г}}{\text{еф.кВт.год}} \quad (5)$$

де G_T – годинна витрата палива, $\frac{\text{г}}{\text{год}}$.

В результаті аналітичних досліджень отримано графіки залежності зміни ефективної потужності і ефективної питомої витрати біогазу від зміни температури і зміни атмосферного тиску довкілля.

Ці залежності показані на рисунках 2, 3, 4, 5.

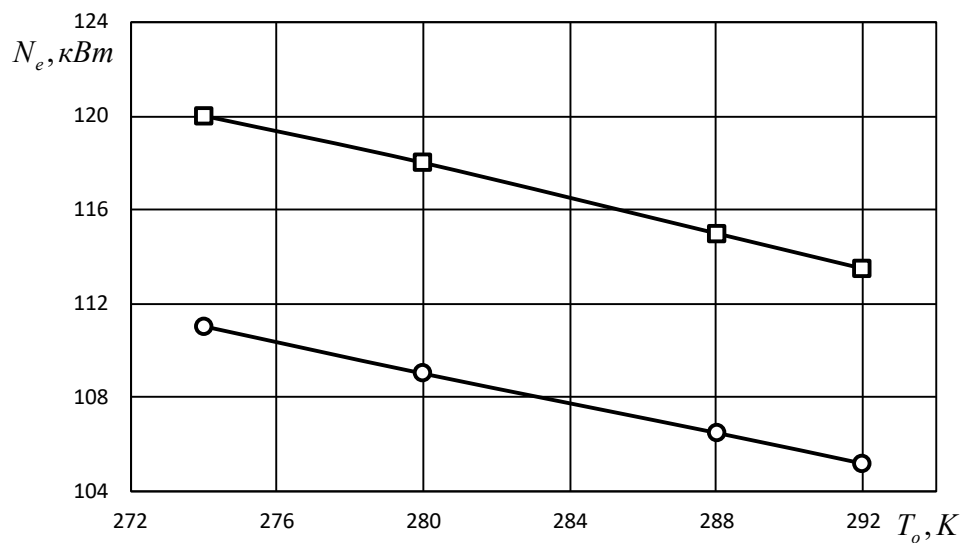


Рисунок 3 – Залежність зміни ефективної потужності двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни температури довкілля

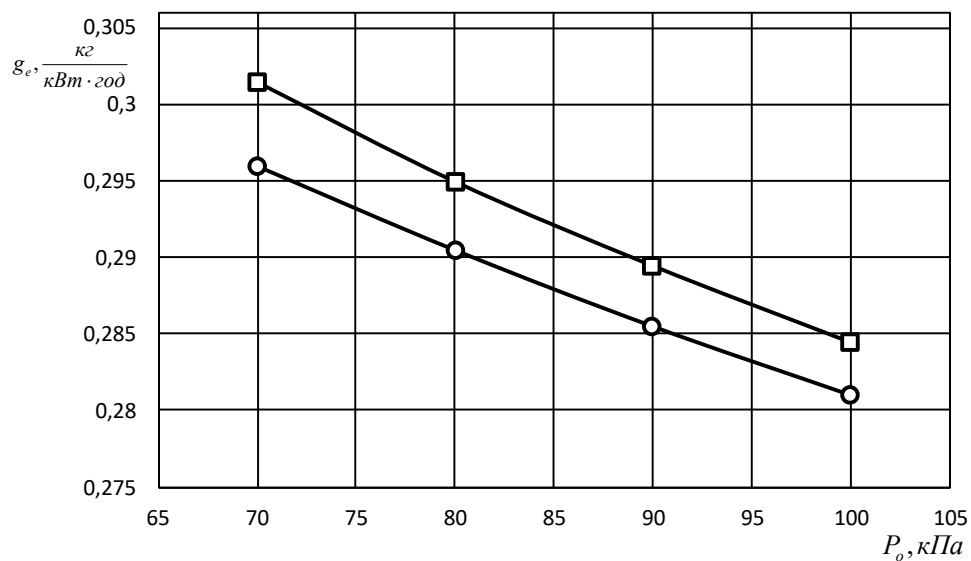


Рисунок 4 – Графік зміни питомої ефективної витрати палива двигуна ЗМЗ-5234.10 від зміни атмосферного тиску

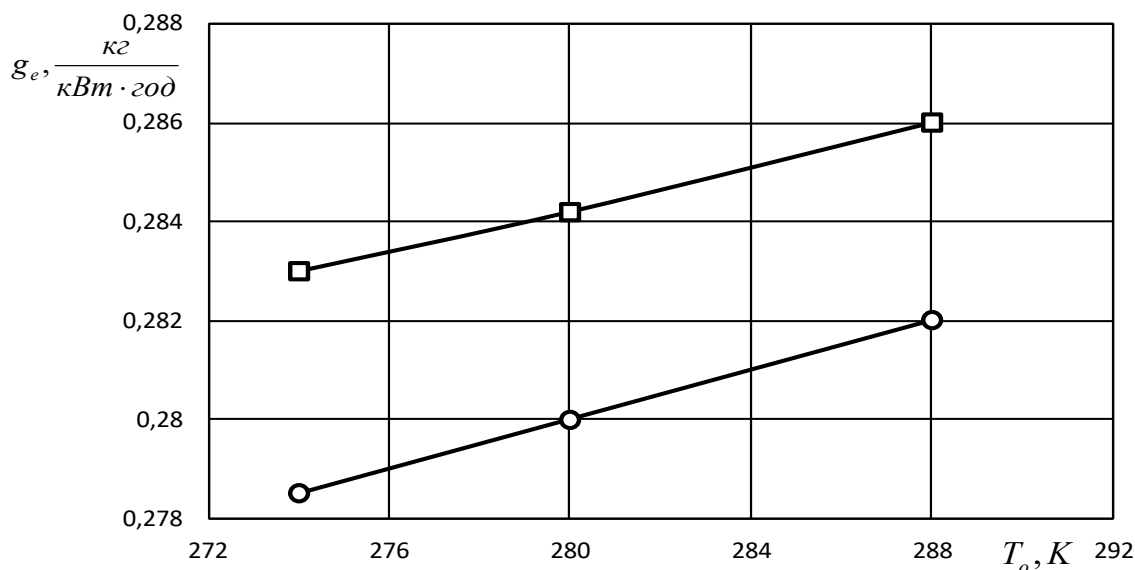


Рисунок 5 – Графік зміни питомої ефективної витрати палива двигуна ЗМЗ-5234.10 від з міні температури доквілля

Як видно з дослідження, при використанні біогазу як автомобільного палива в гірських умовах зі знизенням атмосферного тиску знижується в порівнянні з бензином ефективна потужність на $6 \div 9 \%$ і збільшується питома ефективна витрата палива на $7,3 \div 7,5 \%$ в залежності від величини зменшення тиску. При знизенні температури доквілля ефективна потужність двигуна знижується на $14 \div 16 \%$ і збільшується питома ефективна витрата палива на $14 \div 20 \%$. Вплив цих факторів можна зменшити за рахунок додавання до біогазу природного газу. Як впливає це на питому ефективну витрату палива в двигунах показано на рисунку 6.

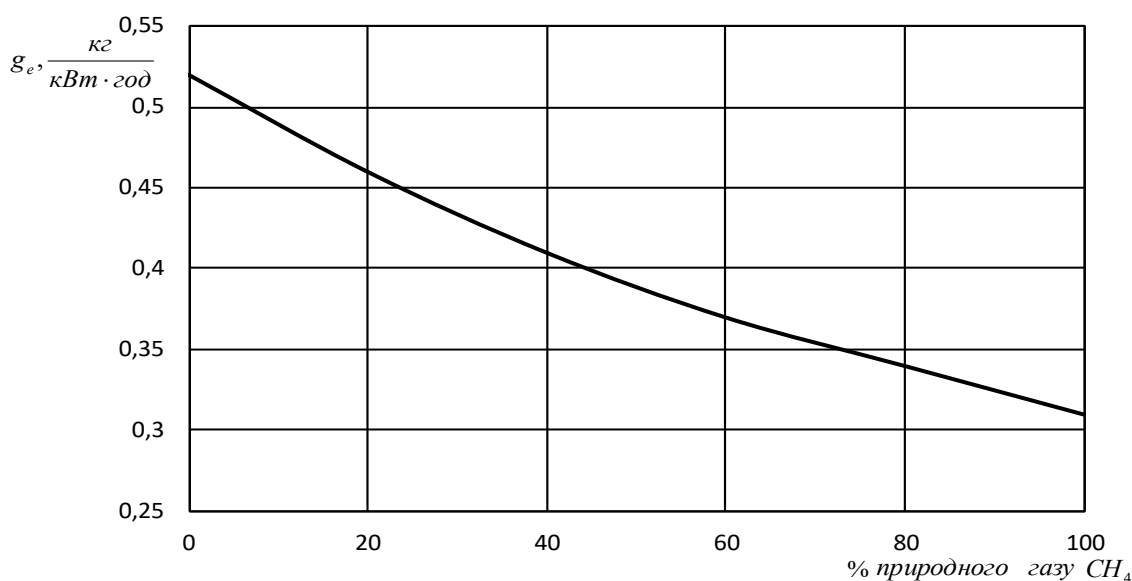


Рисунок 6 – Графік зміни питомої ефективної витрати палива при додаванні природного газу

Висновки:

1. Використання біогазу для двигунів внутрішнього згорання в гірських умовах може частково вирішити проблему дефіциту палива. Для цього в Україні є необхідні резерви.

2. Оскільки нижча теплота згорання біогазу на $(40 \div 45) \%$ менша ніж у традиційного палива з нафти, потужність і питома ефективна витрата палива при експлуатації автомобілів в гірських умовах суттєво змінюється. В залежності від температури доквілля потужність знижується на $14 \div 16 \%$, а питома витрата пального зростає на $14 \div 20 \%$. В залежності від висоти відповідно потужність знижується на $6 \div 9 \%$, а витрата пального зростає на $7,3 \div 7,5 \%$.

3. Покращити техніко-експлуатаційні показники роботи двигунів внутрішнього згорання можна за рахунок додавання до біогазу природного газу.

Список використаної літератури

1. International Energy Outlook 2001. U.S. Department of Energy, March 2001 (IEO 2001).
2. Турсунов А.А., Абдуллаев М.А. Влияние атмосферно-климатических условий и рельефа местности на эффективность работ автомобилей. Проблемы транспорта Дальнего Востока: Сб. Владивосток. 2001. №1. С.277-279.
3. Кулешов А.С. Программа расчета и оптимизации двигателей внутреннего сгорания ДИЗЕЛЬ-РК. М: МГТУ им. Баумана. 2004. 123 с.
4. Дикун Т.В., Мельник В.М., Гаєва Л.І., Долишній Б.В., Януш А. Аналіз роботи автомобільних двигунів в гірських умовах на газовому паливі. Нафтогазова енергетика. Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал. ІФНТУНГ. Івано-Франківськ. 2014. № 2 (22) 2014 . С. 110-116.
5. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни. К: Арістей, 2004. – 438 с.
6. Биогаз (Электронный ресурс). – Режим доступа: [http://uk.wikipedia.org/wiki/ Биогаз](http://uk.wikipedia.org/wiki/Биогаз).

T. Dykun, Assis. Prof., ORCID 0000-0003-2005-2986

L. Haieva, Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4948-845X

F. Kozak, Cand. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-9147-883X

Ya. Demianchuk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2005-2986

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

BIOGAS AS AN ALTERNATIVE FUEL FOR AUTOMOTIVE TRANSPORT IN MOUNTAIN AREAS

The potential of low-calorie gases, in particular, biogas, which Ukrainian agriculture and industry produce in significant quantities, is almost never used here. The number of available domestic facilities for recycling such gases is scanty, although, in most developed countries, the significant number of such factories is operating. Landfill biogas is one of the promising energy sources, still, today, it is either emitted into the atmosphere, polluting it, or burned in flares. The use of biogas as fuel in automotive internal combustion engines is not sufficiently studied. However, the substitution of gasoline for biogas reduces engine power and increases fuel consumption. Especially this should be taken into account when operating vehicles in mountainous terrain under the conditions of reduced atmospheric pressure and temperature. Nevertheless, researching how mountain conditions can influence the performance of biogas-powered automobile engines is not given enough attention yet in Ukraine and in the world. Operation of cars on the mountain roads of the Carpathian region at the altitudes of 1000 ÷ 2000 m above sea level with rises and descents up to 12% and the section length up to 10 ÷ 15 km is difficult. The higher is the level of the terrain above the sea, the lower become the atmospheric pressure, air density and temperature, which deteriorates the filling of the car engine cylinders. The engine cooling rate decreases because of the air dilution and small speeds on steep slopes. Simultaneously, running engines on an excessively enriched fuel-air mixture and moving mainly in lower gears lead to engine overheating. Under the mountainous terrain conditions, Air to Boil temperature decreases. As we know the blend composition of biogas, it is possible to calculate its combustion value as well as the combustion value of the gas-air mixtures. Based on analytical research, we have plotted some graphs that reflect the dependence of the changes in the effective power and effective specific biogas consumption on the changes in ambient temperature and atmospheric pressure.

Keywords: biogas, efficiency, the heat of combustion, atmospheric pressure, temperature, power, specific consumption.

REFERENCES

1. International Energy Outlook 2001. U.S. Department of Energy, March 2001 (IEO 2001).
2. Tursunov A.A. Vlyaniye atmosferno-klymatycheskykh uslovyi y relefa mestnosity na effektivnost raboty avtomobylei (Influence of atmospheric-climatic conditions and terrain on car performance) / A.A. Tursunov, M.A. Abdulloev // Problemy transporta Dalneho Vostoka: Sb. – Vladivostok, 2001. – №1. – Pp. 277-279. (in Russian).
3. Kuleshov A.S. Prohramma rascheta y optymyzatsyy dvyhatelei vnutrenneho shoranyia DYZEL-RK (Software for calculation and optimization of internal combustion engines DIESEL-RK) / A.S. Kuleshov. – M: MHTU named after Bauman, 2004. – 123 p. (in Russian).

4. Avtomobilni dvyhuny (Automobile engines) / Abramchuk F.I., Hutarevych Yu.F., Dolhanov K.Ie., Tymchenko I.I. – K: Aristei, 2004. – 438 p. (in Ukrainian)
5. Biogas. – URL: <http://uk.wikipedia.org/wiki/Биогаз>.

УДК 621.431.36

Т.В. Дикун, ст. преп., ORCID 0000-0003-2005-2986

Л.И. Гаева, канд. хим. наук, доц., ORCID 0000-0003-4948-845X

Ф.В. Козак, канд. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-9147-883X

Я.М. Демянчук, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-2005-2986

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

АНАЛИЗ РОБОТЫ АВТОТРАНСПОРТА НА БИОГАЗЕ В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Актуальность проблемы эффективного использования традиционных источников энергии и поиск альтернативных ресурсов не вызывает сомнения. На сегодня в Украине почти не используется потенциал низкокалорийных газов в большом количестве производятся сельским хозяйством и промышленностью, в частности биогаза. Количество существующих отечественных установок по утилизации этого газа является незначительным, хотя в большинстве развитых странах насчитывается сотни и тысячи таких установок. Одним из перспективных источников энергии является биогаз свалок, который сегодня выбрасывается в атмосферу и загрязняет ее, или сжигается в факельных установках. Малоразвитым направлением использования биогаза - использование его в качестве топлива в автомобильных двигателях внутреннего сгорания. Однако замена бензина на биогаз приводит к уменьшению мощности двигателей и к увеличению расхода топлива. Особенно это следует учитывать при эксплуатации автомобилей в горной местности - при уменьшении атмосферного давления и температуры. Зная компонентный состав биогаза можно рассчитать его теплоту сгорания та теплоту сгорания газоповітряних сумішей. В результаті аналітичних досліджень отримано графічні залежності зміни ефективної потужності і ефективної питомої витрати биогазу від зміни температури та зміни атмосферного тиску довкілля.

Ключевые слова: биогаз, эффективность, теплота сгорания, атмосферное давление, температура, мощность, удельный расход.

Надійшла 21.03.2020

Received 21.03.2020

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!

Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули 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 елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!

Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі Microsoft Word (версії 2007 та вище) і зберігається з розширенням *.doc або *.docx.

Обов'язково надсилається стаття, збережена у форматі *.pdf !!!

Загальне оформлення:

1) Мова. Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

2) Параметри сторінки:

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – 2,5 см.
- Вирівнювання основного тексту – за шириною.
- Перші рядки всіх абзаців – з відступом 1,0 см!!!
- Шрифт – Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – кегль 14.
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) Структура статті:

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: І.І. Петренко (укр.), И.И. Петренко (рос.) I. Petrenko (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- (Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **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). В англійській версії статті наводиться реферат обсягом 1700-2000 знаків,
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

Основний текст статті

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 поділом на частини з відповідними назвами);

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів: будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом.** Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю **не менше 300 dpi.** 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. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

Графіки повинні містити підписи **усіх осей на самому рисунку.** Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправляти не буде!

Таблиці. При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

Формули повинні бути набрані за допомогою редактора формул **Math Type (версія 6.8 і вище)** або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з **розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9.** 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 **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

Висновки: (навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

Список використаної літератури наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних **літературних джерел подається двічі:** мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятую лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:

(Анкети подаються **3 мовами (укр., англ. та рос.)**. Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.

Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:

- стаття версія в форматі *.doc або *.docx;
- стаття версія в форматі *.pdf (**ОБОВ'ЯЗКОВО**);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

Контакти:

- тел.: **+38(044) 204-82-37;**
- сайт: [http://energy.kpi.ua;](http://energy.kpi.ua)
- e-mail: kravkpi@ukr.net