

ISSN 1813-5420

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№1–2017

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 1 (47) - 2017

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Енергетичні системи та комплекси.
Енергетична ефективність та енергозбереження
Технології та обладнання в енергетиці.
Економічні аспекти енергетики.

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2017

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 Йоахім (*Інститут енергетики м. Хамм, Німеччина*), В.М. Постолатий (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*)

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

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

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

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до рішення Атестаційної колегії МОН України від 13 грудня 2016 р., затверджене наказом МОН України № 1604 від 22 грудня 2016 р. Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PИИЦ, 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 № 5 від 15 квітня 2017 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка П.В. Соколовський.

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

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

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017

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

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 1 (47) - 2017

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Energy systems and complexes
Energy efficiency and energy saving
Energy technologies and equipment
Economic aspects of power-engineering

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2017

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*).

Technical secretary N.O. Kravchuk

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

Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media series KB №4135 dated 30 March 2000

The Journal was registered by decision Attestation commission MES of Ukraine of December 13, 2016, approved by order of MES of Ukraine № 1604 of December 22, 2016 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, RSCI, 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 № 5 on April 15, 2017).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing P.V. Sokolovskyi.
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 IPP PPC "Politehnika", Kyiv, 14 Polytechnique str., b. 15.

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

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

В.В. Зорин, Н.А. Докийчук, Р.А. Буйный, В.А. Перепечный. Модели и методы определения потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях 0,38 кВ высотных зданий при проектировании и эксплуатации	7
А.В. Волошко, В.П.Калінчик. До визначення усередненої електричної потужності	14
О.И. Александров, С.В. Домников, Д.О. Иванько. Оптимизация режима энергосистемы методом наибольшего гарантированного результата	19
В.А. Попов, Р.А. Романюк. Учет неопределенности информации при многокритериальной оценке альтернативных вариантов применения распределенной генерации.....	30
В.І. Василенко. Формування оптимальної структури локальної електроенергетичної системи на основі оцінки міри близькості розміщення об'єктів.....	36
К.Н. Ткачук, В.В. Калінчик. Формування факторного поля небезпечних та шкідливих чинників виробничої системи	46

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

М.Ф. Боженко, І.Я. Перевьорткіна. Підвищення ефективності утилізаторів теплоти димових газів котельень за рахунок зволоження дуттьового повітря.....	51
О.О. Закладний, В.В. Прокопенко. Оцінка залишкового ресурсу електромеханічних систем при проведенні енергетичного аудиту	58

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

С.В. Зайченко, Н.А. Шевчук, В.В. Вапнічна, В. Диновська, А.В. Квіщук. Удосконалення технології збагачення паливно-енергетичних корисних копалин шляхом модернізації елементів гірничотранспортних комплексів	64
В.О. Бржезицький, І.М. Маслюченко, М.Ю. Лапоша. Граничний вплив неідентичності r-, c-елементів високовольтного подільника напруги на його частотні характеристики.....	70
В.В. Михайленко, І. В. Майкович, Т.А. Наухацька., Р. Рокицький. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачі з двадцятизонним регулюванням вихідної напруги.....	77
С.В. Бойченко, Феноменологическая концепция химмотологии	83

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТИКИ

Ю.Г. Качан, В.Л. Коваленко, А.А. Візер. Визначення економії споживання промисловим підприємством природного газу за наявності у робочих об'ємах його камерних печей просторового електричного поля	91
Вимоги до оформлення статей.....	95

CONTENTS

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- V. Zorin, N. Dokiychuk, R. Buinyi, V. Perepechenyi.** Models and methods to determine the loss of power and electricity in 0.38kv urban electric networks in projected and operated high-rise buildings..... 7
- A.Voloshko, V.Kalinchuk.** On the definition of electric power averaging..... 14
- O. Alexandrov, S. Domnikov.** Optimization of the mode of a power supply system by method of the greatest guaranteed result 19
- V. Popov, R. Romaniuk.** Taking into account of the information uncertainty in the multicriteria evaluation of alternatives of distributed generation integration 30
- V. Vasilenko.** Formation the optimal structure of local power system based on valuation of proximity placement of objects 36
- K. Tkachuk, V. Kalinchuk.** Forming of vector field of hazardous and harmful production system factors..... 46

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

- M. Bozhenko, I. Perevortkina.** Improving efficiency of heat utilizers of smoke gases of boiler plants at the expense of wetting of blowing air..... 51
- O. Zakladnyi, V. Prokopenko.** Remaining resource estimation of electromechanical systems for energy audit 58

ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- S. Zaychenko, N. Shevchuk, V. Vapnichna, O. Dynovska, A. Kvishchuk.** Improving the technology of beneficiation of energy minerals modernizing elements of the transport complex 64
- V. Brzhezytskyi, I. Maslyuchenko, M. Laposha.** Maximum influence of nonidentical r- and c-elements of a high-voltage divider on its frequency characteristics 70
- V. Mihaylenko, I. Maykovych, T. Nauhatska, R. Rokytskyi.** Analysis of the electromagnetic processes in converter with twenty zone regulation output voltage 77
- S. Boychenko,** Phenomenological concept of chemmotology..... 83

ECONOMIC ASPECTS OF POWER-ENGINEERING

- Y. Kachan, V. Kovalenko, A. Vizer.** About reducing the natural gas of chamber furnaces in the presence of a spatial electric field in its chamber at the industrial plant 91

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311.01

В.В. Зорин, д-р техн. наук, проф.

Н.А. Докийчук, инженер,

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Р.А. Буйный, канд. техн. наук, доц.,

Черниговский национальный технологический университет;

В.А. Перепечный, канд. техн. наук, доц.,

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.М. Бекетова

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,38 кВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Предложена усовершенствованная математическая модель электрической сети многоэтажных зданий и метод расчета и оценки потерь мощности и электрической энергии на основе данных измерений потерь напряжения на характерных участках схемы электрической сети. Рассмотрен алгоритм расчета таких параметров режима, как потери напряжения ΔU , мощности ΔP и электроэнергии ΔW в электрической сети 0,38 кВ зданий высотной застройки города при проектной и эксплуатационной постановке задачи. На конкретном примере показана адекватность результатов расчета по предложенному методу. Простота предложенного метода расчета потерь мощности ΔP и потерь электроэнергии ΔW в электрической сети 0,38 кВ многоэтажного дома позволяет систематически контролировать режимы работы сети и своевременно проводить мероприятия по энергосбережению.

Ключевые слова: расчетная схема, параметры режимов, потери мощности, потери напряжения, эксплуатационная постановка, проектная постановка задачи.

Введение. Для осуществления энергосберегающих мероприятий в городских распределительных электрических сетях необходимо систематически производить расчеты параметров режимов и делать оценку потерь мощности и электроэнергии. В [1] приведена подробная классификация методов расчета нагрузочных потерь. К ним относятся: методы поэлементных расчетов, характерных режимов, характерных суток, числа часов наибольших потерь, средних нагрузок, которые называются схемотехническими. Статистические методы не требуют проведения электрических расчетов, а используют устойчивые характеристики зависимости потерь от обобщенных параметров сети.

Объектом исследования в данной работе являются электрические распределительные сети напряжением 0,38 кВ районов города с многоэтажной застройкой.

Целью и задачами данной работы является разработка усовершенствованной математической модели электрической сети многоэтажных зданий для расчетов и оценки потерь мощности и электрической энергии на основе данных измерений потерь напряжения на участках электрической сети.

Один из известных способов определения потерь мощности и электроэнергии в сетях 0,38 кВ основан на использовании корреляционной связи между потерей напряжения и потерей мощности в сети и называется методом коэффициента $K_{м/н}$ [2,3]. Выбор математических моделей и адекватных им методов расчета и анализа потерь мощности и электрической энергии определяется видом доступной информации о параметрах и режимах сети, а также целью и необходимой точностью расчета.

При выборе той или иной методики необходимо учитывать масштабы электрических сетей, массовость и периодичность расчетов. Естественно, что при разовых, индивидуальных расчетах могут быть использованы более точные методы, а при массовых, часто повторяющихся расчетах сетей большого объема, следует использовать более простые и менее точные методики. Следует иметь в виду, что при расчетах сетей больших объемов погрешности могут взаимно компенсироваться и общий результат может иметь приемлемую точность.

По требуемой степени точности расчетов можно выделить три группы моделей:

1. Оценочные модели, используемые для приближенных расчетов.

2. Более простые модели, применяемые при инженерных, оптимизационных и оперативных расчетах режимов, которые рассматриваются в данной статье.

3. Высокоточные модели, требующие детальной информации о параметрах и режимах сети, которые применяются при исследовательских и индивидуальных расчетах.

Материал и результаты исследований. Рассмотрим применение метода $K_{м/н}$ для определения потерь мощности как функции от потери напряжения $\Delta P_i = f(\Delta U)$. В этом случае, при определении потерь мощности с использованием коэффициента $K_{м/н}$, необходимо в часы зимнего максимума измерять напряжение в начале U_1 и на конце каждого участка U_2 схемы сети на всех трех фазах. При этом потеря напряжения по отношению к номинальному U_n определяется по формуле:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_1 - U_2}{U_n} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Если фазные напряжения различны, то для дальнейших расчетов в качестве U_1 и U_2 рекомендуется принимать их среднее арифметическое значение.

При этом потери мощности на участке сети (в кВт или %) в сети по отношению к активной мощности на этом участке P_i вычисляются по формулам:

$$\Delta P_i = \frac{P_i \cdot K_{м/н} \cdot \Delta U_{\%}}{100}, \text{ кВт}; \quad (2)$$

$$\Delta P_i = \frac{K_{м/н} \cdot \Delta U_{i\%}}{100}, \%, \quad (3)$$

где P_i – измеренная активная мощность, протекающая по i-у участку электрической сети; $K_{м/н}$ – коэффициент, взятый из табл.1; $\Delta U_{i\%}$ – потеря напряжения на i-м участке сети.

Таблица 1 – Значения коэффициента $K_{м/н}$ и относительных потерь мощности $\Delta P_{\%}$ для различных видов распределения нагрузки и принятых допущений при расчете параметров схемы замещения линий

Вид распределения нагрузки и параметры схемы замещения ЛЭП	Значения коэффициента $K_{м/н}$ и относительных потерь мощности $\Delta P_{\%}$	
	$K_{м/н}$	$\Delta P_{\%}$
Сосредоточенная нагрузка в конце ЛЭП, $x_0 = 0$ и $\cos \varphi = 1$	1	$K_{м/н} \cdot \Delta U_{\%}$
Сосредоточенная нагрузка в конце ЛЭП, $x_0 = 0$ и $\cos \varphi \neq 1$	$\frac{1}{\cos^2 \varphi}$	
Равномерно распределенная нагрузка, $x_0 = 0$ и $\cos \varphi = 1$	0,67	
Равномерно распределенная нагрузка, $x_0 = 0$ и $\cos \varphi \neq 1$	$\frac{0,67}{\cos^2 \varphi}$	
Для любых случаев распределения нагрузки	$(1 + tg^2 \varphi) / \left(1 + \frac{x_0}{r_0} \cdot tg^2 \varphi \right)$	

В [2,3] приводятся только общие, принципиальные положения использования коэффициента $K_{м/н}$ для расчетов потерь мощности в электрической сети. В настоящей статье предлагается универсальная модель, удобная для обработки и не требующая большого объема исходных данных.

Исходные данные для решения проектной задачи. Рассмотрим проектную задачу определения потерь мощности ΔP в электрической сети 16 этажного жилого дома (рис.1) с 3-я секциями, 3-я квартирами на этаже. В квартирах установлены электроплиты мощностью 8,5 кВт, $\cos \varphi = 1$. Также примем, что индуктивное сопротивление внутридомовых сетей 0,38 кВ $x_0 = 0$.

Стояк 1. Общее число квартир 48, удельная нагрузка на квартиру согласно [2]:

$$P_{y\partial} = 2,23 \text{ кВт/квартиру}; \quad P = 2,23 \cdot 48 = 107 \text{ кВт}; \quad I = \frac{107}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 163 \text{ А.}$$

Электрическая сеть выполнена проводом АПВ 4х95 в трубах для которого погонное активное сопротивление $r_0 = 0,326$ Ом/км.

Стояки 1, 2, 3. Общее число квартир $N_{\Sigma} = 48 \cdot 3 = 144$ кв., удельная нагрузка на квартиру согласно [2]:

$$P_{y,d} = 1,56 \text{ кВт/квартиру}; \quad P_{OA} = 1,56 \cdot 144 = 225 \text{ кВт}; \quad I_{OA} = \frac{225}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 342 \text{ А}.$$

От ТП к дому подходит двухцепная КЛ 4х95мм² для которой погонное активное сопротивление $r_0 = \frac{0,326}{2} = 0,163$ Ом/км.

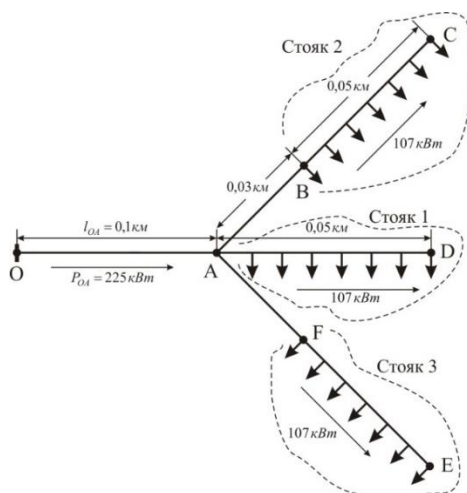


Рисунок 1 – Исходная схема сети 0,38 кВ 16-этажного жилого дома

Определим потерю напряжения на участке схемы сети OA с сосредоточенной нагрузкой по формуле:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_i \cdot r_{0i} \cdot l_i}{10 \cdot U_H}, \quad (4)$$

где I_i – ток, протекающий на i -м участке, А; r_{0i} – погонное активное сопротивление провода на i -м участке, Ом/км; l_i – длина i -го участка, км.

Для участков OA, AB и AF с сосредоточенной нагрузкой потеря напряжения будет составлять (рис.2):

$$\Delta U_{OA\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 342 \cdot 0,163 \cdot 0,1}{10 \cdot 0,38} = 2,54\%, \quad \Delta U_{AB\%} = \Delta U_{AF\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 163 \cdot 0,326 \cdot 0,03}{10 \cdot 0,38} = 0,73\%.$$

Потерю напряжения на участках BC, AD, FE (рис 2) с равномерно распределенной нагрузкой определим по формуле:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_i \cdot r_{0i} \cdot \frac{1}{2} \cdot l_i}{10 \cdot U_H}, \quad (5)$$

$$\Delta U_{BC\%} = \Delta U_{AD\%} = \Delta U_{FE\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 163 \cdot 0,326 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,05}{10 \cdot 0,38} = 0,603\%.$$

Определяем потери мощности на участках схемы сети (рис.3) с сосредоточенной нагрузкой по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{P_i^2}{U_H^2} \cdot r_{0i} \cdot l_i \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (6)$$

где P_i – активная мощность, протекающая на i -м участке, кВт.

Для участков OA, AB и AF активные потери будут составлять:

$$\Delta P_{OA} = \frac{225^2}{0,38^2} \cdot 0,163 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 5,71 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{AB} = \Delta P_{AF} = \frac{107^2}{0,38^2} \cdot 0,326 \cdot 0,03 \cdot 10^{-3} = 0,775 \text{ кВт}.$$

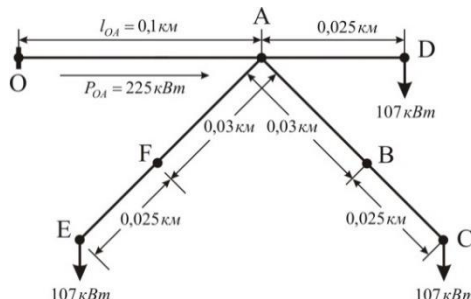


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения потерь напряжения $\Delta U_{\%}$

Потери мощности на участках схемы сети BC, AD, FE с равномерно распределенной нагрузкой (рис.3) определяются по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{P_i^2}{U_n^2} \cdot r_{0i} \cdot \frac{1}{3} \cdot l_i \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}; \quad (7)$$

$$\Delta P_{BC} = \Delta P_{AD} = \Delta P_{FE} = \frac{107^2}{0,38^2} \cdot 0,326 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} = 0,43 \text{ кВт}.$$

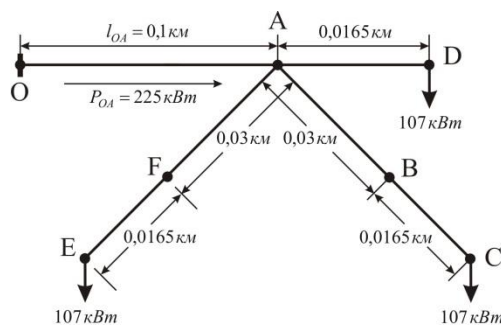


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения потерь мощности ΔP

Эксплуатационная постановка решения задачи $\Delta P_i = f(\Delta U)$. Для решения поставленной задачи определения потерь мощности в районах города с застройкой высотными зданиями необходимо в часы зимнего вечернего максимума нагрузки провести измерения потерь напряжения на каждом участке схемы сети 0,38 кВ (рис.1). Такие измерения должны проводиться одновременно приборами с классами точности 0,1 или 0,2, что позволит определить потерю напряжения с точностью до 10%.

Относительная потеря напряжения в % определяется по формуле (1).

Рассмотрим основные положения предлагаемой методики расчета потерь активной мощности ΔP и потерь электрической энергии ΔW по результатам измерений наибольшей потери напряжения $\Delta U_{\%}$ на примере 16-ти этажного жилого дома.

Определяем потери мощности ΔP_i на участках схемы сети с сосредоточенными нагрузками по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{P_i \cdot \Delta U_{i\%}}{100}, \quad (8)$$

а для участков с равномерно распределенными нагрузками – по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{P_i \cdot K_{м/н} \cdot \Delta U_{i\%}}{100}. \quad (9)$$

Для сосредоточенных нагрузок на участках OA, AB и AF они равны:

$$\Delta P_{OA} = \frac{225 \cdot 2,54}{100} = 5,71 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{AB} = \Delta P_{AF} = \frac{107 \cdot 0,73}{100} = 0,78 \text{ кВт}.$$

Суммарные потери мощности на участках с сосредоточенной нагрузкой:

$$\Delta P_{\Sigma \text{соср.}} = \Delta P_{OA} + \Delta P_{AB} + \Delta P_{AF} = 5,71 + 0,78 + 0,78 = 7,27 \text{ кВт}.$$

Для участков с равномерно распределенной нагрузкой:

$$\Delta P_{BC} = \Delta P_{AD} = \Delta P_{FE} = \frac{107 \cdot 0,67 \cdot 0,603}{100} = 0,43 \text{ кВт};$$

Суммарные потери по участкам с равномерно распределенной нагрузкой:

$$\Delta P_{\Sigma \text{распр.}} = \Delta P_{BC} + \Delta P_{AD} + \Delta P_{FE} = 0,43 + 0,43 + 0,43 = 1,29 \text{ кВт}.$$

Суммарные потери мощности составляют: $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma \text{соср.}} + \Delta P_{\Sigma \text{распр.}} = 7,27 + 1,29 = 8,56 \text{ кВт}$.

Примем допущение, что потери напряжения на участках схемы сети дома, рассчитанные по данным замеров $\Delta U_{\% \text{изм}}$, равны расчетным потерям напряжения при проектировании $\Delta U_{\% \text{проект}}$:

$$\Delta U_{\% \text{изм}} = \Delta U_{\% \text{проект}}. \quad (10)$$

Такое допущение обеспечит проверку правильности расчетов по критерию $\Delta P_i = f(\Delta U)$ предлагаемой методики. Результаты расчетов для лучшего сопоставления сведены в табл. 2, из которой видно, что они являются практически идентичными при разных постановках задачи. Это подтверждает адекватность предложенного метода.

Таблица 2 – Результаты расчетов потерь напряжения и мощности для схемы электрической сети при проектной и эксплуатационной постановках

Участки сети	Характеристика участка	Значения рассчитанных параметров режимов для задач в постановках		
		проектной		эксплуатационной
		$\Delta U_{\%}$, % (номер формулы)	ΔP_i , кВт (номер формулы)	ΔP_i , кВт (номер формулы)
OA	Сосредоточенная нагрузка	2,54 (4)	5,71 (6)	5,71 (8)
AB, AF	Сосредоточенная нагрузка	0,73 (4)	0,775 (6)	0,78 (8)
OA, AB, AF	Всего сосредоточенная нагрузка	–	7,26	7,27
AD	Распределенная нагрузка	0,603 (5)	0,43 (7)	0,43 (9)
AD, BC, FE	Всего распределенная нагрузка	–	1,29	1,29
	Всего по схеме	–	8,55	8,56

По найденным значениям максимальных потерь мощности на участках схемы сети 0,38 кВт $\Delta P_{i \text{max}}$ могут быть рассчитаны потери электроэнергии ΔW_i через продолжительность максимальных потерь τ :

$$\Delta W_i = \Delta P_{i \text{max}} \cdot \tau; \quad (11)$$

$$\tau \approx \left(0,124 + \frac{T_{\max}}{10^4} \right)^2 \cdot 8760, \quad (12)$$

где T_{\max} – число часов использования максимальной нагрузки.

Для рассматриваемого примера при $T_{\max} = 3000$ имеем:

$$\tau \approx \left(0,124 + \frac{3000}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 1575 \text{ ч/год.}$$

Для участков с сосредоточенной нагрузкой при $\Delta P_{\Sigma \text{соср}} = 7,27$ кВт потери электроэнергии равны:

$$\Delta W_{\text{соср}} = 7,27 \cdot 1575 = 11450 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

а для участков с равномерно распределенной нагрузкой при $\Delta P_{\Sigma \text{распр}} = 1,29$ кВт:

$$\Delta W_{\text{распр}} = 1,29 \cdot 1575 = 2032 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Суммарные потери электроэнергии по электрической сети (рис.1) составляют:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_{\text{соср}} + \Delta W_{\text{распр}} = 11450 + 2032 = 13482 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Выполнение одновременных замеров напряжения в начале и в конце участков сети 0,38 кВ является весьма трудоемкой задачей для персонала электросетей города. Поэтому можно и целесообразно использовать метод случайной выборки [3]. Суть метода состоит в расчете потерь электроэнергии по методу $K_{\text{м/н}}$ не во всех сетях, а только в их части. Если исследуемые сети 0,38 кВ можно разбить на характерные группы, то объем выборки можно существенно сократить. Например, группировать здания по этажности и числу секций в здании. Рассчитать потери электроэнергии для характерных схем каждой группы и затем распространить результаты на все множество схем.

Выводы

1. Рассмотрен алгоритм расчета параметров режима ΔU , ΔP и ΔW в электрической сети напряжением 0,38 кВ зданий высотной застройки города при проектной постановке задачи.

2. В проектной постановке задачи определения параметров режима работы электрической сети 0,38 кВ следует использовать расчетную модель для определения потерь напряжения $\Delta U\%$, представленную на рис.2, а для расчета потерь мощности ΔP – на рис.3.

3. В эксплуатационной постановке задачи потери мощности ΔP могут быть получены путем одновременных измерений режима напряжений в начале и в конце каждого характерного участка схемы электроснабжения дома и соответствующего коэффициента $K_{\text{м/н}}$.

4. Простота предложенного метода для расчета потерь мощности ΔP и электроэнергии ΔW в электрической сети 0,38 кВ многоэтажного дома позволяет систематически контролировать ее режимы работы и своевременно проводить мероприятия по энергосбережению.

Список использованной литературы

1. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176с.
2. Вопросы методики определения и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях. – Л.: Минэнерго, 1958. – 265с.
3. Железко Ю.С. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 366с.
4. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 104с.
5. Зорін В.В., Штогрин Е.А., Буйний Р.О. Електричні мережі та системи. – Ніжин: «Аспект-Поліграф», 2011. – 248с.
6. Зорин В.В., Буйный Р.А., Перепеченый В.А. Модели и методы расчета и оценки потерь мощности и электрической энергии в распределительных сетях 0,38кВ // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – №5(136). – С.19-27.

V. Zorin, DSc, professor;
N. Dokiychuk, engineer,
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
R. Buinyi, Ph.D., associate professor,
Chernihiv National University of Technology;
V. Perepechenyi, Ph.D., associate professor, O. Beketov,
National University of Urban Economy in Kharkiv

**MODELS AND METHODS TO DETERMINE THE LOSS OF POWER AND ELECTRICITY
IN 0.38kV URBAN ELECTRIC NETWORKS IN PROJECTED
AND OPERATED HIGH-RISE BUILDINGS**

An improved mathematical model of the electrical network in multi-storey buildings is proposed. It allows for an improved method of estimation and measurement of the power and power loss using the voltage loss measurements on specific areas of the electric network. Discussed is the algorithm of calculation of model parameters such as voltage drop ΔU , power ΔP and energy ΔW in the electric grid of 0.38 kV high-rise buildings (projected and in operation). Using a particular example we showed the adequacy of the calculations made according to the proposed method. The simplicity of the proposed method of calculating the loss of power ΔP and energy losses ΔW in 0.38kV electric networks in high-rise buildings allows for systematic monitoring of the network operation modes and timely conduct energy saving activities.

Keywords: calculation scheme, the parameters of the mode, power loss, voltage loss, operating statement, statement of project problems.

References

1. Zhelezko Yu.S. Choice of measures to reduce energy losses in electric networks. – M.: Energoatomizdat, 1989. –176p. (Rus.)
2. Questions to methods for determining the reduction of energy losses in electric power networks. – L.: Minenergo, 1958. – 265p. (Rus.)
3. Zhelezko Yu.S. Energy losses in electric networks of power systems. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 366p. (Rus.)
4. DBN V.2.5-23:2010. Design of electrical facilities for civil use. – K.: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2010. – 104p. (Ukr.)
5. Zorin V.V., Shtogryn E.A., Buinyi R.O. Electrical power networks and systems. – Nizhyn: «Aspekt-Poligraf», 2011. – 248p. (Ukr.)
6. Zorin V.V., Buinyi R.A., Perepechenyi V.A. Models and methods of calculation and estimation of power losses and electric energy distribution power networks 0.38 kV // Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2015. – №5(136). – P.19-27. (Rus.)

УДК 621.311.01

В.В. Зорін, д-р техн. наук, професор;
Докійчук Н.О., інженер,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Р.О. Буйний, канд. техн. наук, доцент,
Чернігівський національний технологічний університет;
Перепечний В.О., канд. техн. наук, доцент,
Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 0,38 кВ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА
ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Запропоновано вдосконалену математичну модель електричної мережі багатопверхових будівель і метод розрахунку та оцінки втрат потужності і електричної енергії на основі даних вимірювань втрат напруги на характерних ділянках схеми електричної мережі. Розглянуто алгоритм розрахунку таких параметрів режиму, як втрати напруги, потужності і електроенергії в електричній мережі 0,38 кВ будинків висотної забудови міста при проектуванні та експлуатації. На прикладі показано адекватність результатів розрахунку запропонованим методом. Простота запропонованого методу розрахунку втрат потужності і втрат електроенергії в електричній мережі 0,38 кВ багатопверхового будинку дозволяє систематично контролювати режими роботи мережі і своєчасно проводити заходи з енергозбереження.

Ключові слова: розрахункова схема, параметри режимів, втрати потужності, втрати напруги, експлуатаційна постановка, проектна постановка задачі.

Надійшла 13.02.2017
Received 13.02.2017

ДО ВИЗНАЧЕННЯ УСЕРЕДНЕНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

В роботі розглядаються підходи до контролю усередненої електричної потужності. Проаналізовано існуючий підхід, який засновано на визначенні контрольованої потужності за фіксовані інтервали часу протягом проходження максимального навантаження енергетичної системи. Показано, що існуючі засоби, які визначають усереднену потужність на встановлених інтервалах часу, не завжди фіксують можливі перевищення визначеною величиною заданих значень. Запропоновано підхід для контролю усередненої потужності за методом рухомої середньої. Показано, що для фіксації всіх перевищень із заданою довірчою ймовірністю контроль потужності повинен здійснюватися з кроком дискретизації меншим та кратним інтервалу усереднення. Запропоновано практичну реалізацію розглянутого підходу. Наведено структурну схему пристрою контролю усередненої потужності за методом рухомої середньої. Наведено результати експериментальних випробовувань на вугільній шахті.

Ключові слова: потужність, інтервал осереднення, контроль, рухома середня.

Вступ. Існуючі підходи до контролю усередненої потужності засновані на визначенні суміщених навантажень на встановлених інтервалах часу T [1] протягом проходження максимуму навантаження. Суть контролю зводиться до наступного. Починаючи з деякого опорного моменту часу t_{on} (рис.1) визначається середня за час T потужність

$$P_T = \frac{1}{T} \int_{t_{on}}^{t_{on}+T} P(t) dt, \quad (1)$$

де T – час осереднення (як правило, 30 хвилин).

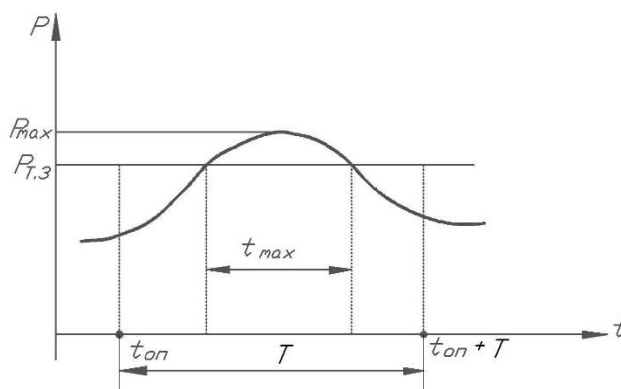


Рисунок 1 – До визначення усередненої за час T потужності

Далі цей процес повторюється через інтервали часу T , тобто від $t_{on} + T$ до $t_{on} + 2T$ і так далі аж до закінчення проходження максимуму навантаження енергосистеми. При цьому повинна виконуватися умова

$$P_i^T \leq P_3^T, \quad (2)$$

де i – номер інтервалу T (30-хвилинного періоду), починаючи з моменту часу t_{on} ; P_3^T – заявлена на час T середня потужність.

У разі невиконання умови (2) існуючі системи і пристрої зареєструють перевищення реальною величиною заявленої потужності.

Метою дослідження є підвищення об'єктивності та точності контролю усередненої електричної потужності.

Матеріал і результати досліджень. Оскільки усереднена потужність контролюється в фіксованих

інтервалах часу T , при існуючому контролі можливе перевищення заявленої потужності на час t_{max} (рис.1), який може бути оцінений на підставі обмеження (2). Сенс величини t_{max} – це той максимальний проміжок часу на контрольованому інтервалі, на якому можна перевищити P_3^T , щоб усереднена потужність, обчислена на цьому інтервалі, задовольняла умові (2).

Припустимо, що перевищення настало в якийсь момент часу $t_1 (t_{on}^i \leq t_1 \leq t_{on}^i + T)$ стрибкоподібно (рис.2). В цьому випадку оцінка t_{max} зводиться до оцінки t_1 . Згідно (1) і (2) запишемо

$$\int_{t_{on}^i}^{t_{on}^i+T} P(t) dt \leq T \cdot P_3^T, \quad (3)$$

або

$$\int_{t_{on}^i}^{t_{on}^i+t_1} P(t) dt + \int_{t_{on}^i+t_1}^{t_{on}^i+T} P(t) dt \leq T \cdot P_3^T. \quad (4)$$

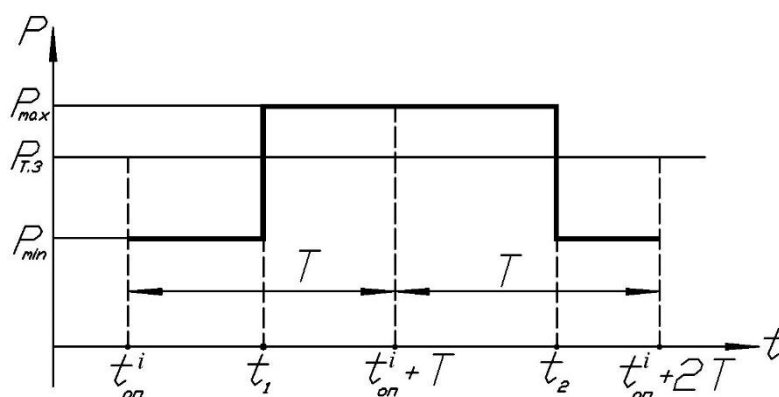


Рисунок 2 – До оцінки методики визначення усередненої за час T потужності

Вирішуючи вираз (4) отримаємо

$$P_{min} \cdot t_1 + P_{max} \cdot (T - t_1) \leq T \cdot P_3^T, \quad (5)$$

де P_{min} – мінімально необхідна потужність підприємства, обумовлена функціонуванням технологічного процесу; P_{max} – максимальна потужність, що перевищує заявлений максимум.

Виражаючи P_{min} і P_{max} через P_3^T і коефіцієнти K_{min} і K_{max} отримаємо

$$\left. \begin{aligned} P_{min} &= K_{min} \cdot P_3^T \\ P_{max} &= K_{max} \cdot P_3^T \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Із (5) з урахуванням (6), отримаємо

$$t_1 \geq \frac{T(K_{max} - 1)}{K_{max} - K_{min}}. \quad (7)$$

Аналіз виразу (7) показує, що якщо при відомій потужності P_{min} величина потужності підприємства рівняється або менше P_{max} , то не буде зафіксовано перевищення P_3^T , якщо час проходження P_{max} менше $(T - t_1)$. В іншому випадку буде зафіксовано перевищення P_3^T на інтервалі $[t_{on}^i, t_{on}^i + T]$.

Покажемо, що за існуючого методу контролю можлива ситуація, коли перевищення заявленої потужністю не буде зафіксовано. Як показано на рис.2, усереднена за час T потужність перевищує заявлену на інтервалі $[t_1, t_2]$, проте існуючі системи контролю цього не зафіксують, оскільки контролюється потужність на інтервалах $[t_{on}^i + T, t_{on}^i + 2T]$. Для виключення подібних ситуацій

усереднену за час T потужність необхідно контролювати не у фіксованих інтервалах, а за методом рухомої середньої, з кроком дискретизації $\bar{\Delta}$ меншим та кратним інтервалу часу (t_{on}^i, t_1) [2,3].

Принцип контролю електричної потужності за методом рухомої середньої показаний на рис.3. Аналітично значення електричної потужності за вищевказаним методом визначається з виразу

$$P_{n\bar{\Delta}}(i\bar{\Delta}) = \frac{1}{n\bar{\Delta}} \int_{(i-n)\bar{\Delta}}^{i\bar{\Delta}} P(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Очевидно, що для фіксації всіх перевищень з довірчою ймовірністю $(1-\delta)$ контроль потужності повинен здійснюватися з кроком дискретизації, визначення якого розглянуто в роботі [4].

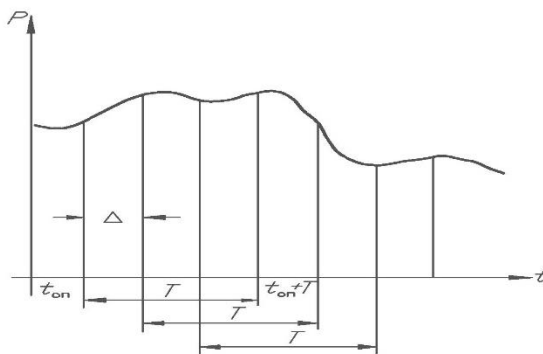


Рисунок 3 – Принцип контролю усередненої потужності за методом рухомої середньої

Для реалізації вказаного підходу контролю усередненої потужності розроблено відповідний пристрій [2], структурна схема якого представлена на рис. 4. До складу пристрою входять блок прийому інформації БПІ, реверсний суматор-лічильник ЛЧ, зсувний регістр РГ, обчислювальний пристрій ОП, блоки регістрів контрольованих параметрів БРГ1 і БРГ2, блок завдання БЗ, блок порівняння БП та блок індикації та реєстрації БІР.

Сигнал з БПІ, який представляє собою пристрій прийому і формування даних, що надходять від лічильників електроенергії, а також виробляє ознаки, які характеризують сигнал як «власні» і «сторонні» потреби, надходить на вхід ЛЧ, що має r двійкових розрядів. Сигнали з ознакою «власні» потреби підсумовуються, а сигнали з ознакою «сторонні» потреби віднімаються. Через інтервал часу Δt інформація переписується в перші r розрядів РГ, а вміст ЛЧ скидається і в нього починає заноситися нова інформація.

Через чергові Δt регістр РГ виконує зсув записаної інформації на r розрядів вправо, а звільнені розряди РГ заповнюються за наступний час Δt суматором-лічильником ЛЧ.

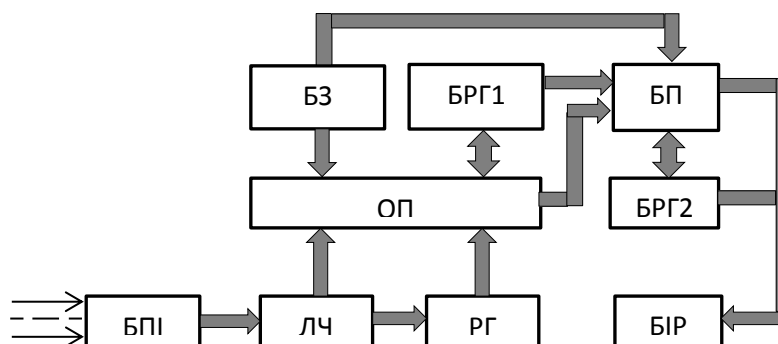


Рисунок 4 – Структурна схема пристрою безперервного контролю електричного навантаження.

Розрядність регістру РГ розраховується на зберігання в ньому інформації, яка може надходити від лічильників електроенергії за час $T - \Delta t$. Таким чином, регістр РГ містить $T/\Delta t - 1 = n - 1$ груп по r розрядів. У момент часу, коли r -розрядні групи РГ задіяні, відбувається скидання всіх $n - 1$ груп регістру і підсумовування накопиченої за період $T - \Delta t$ інформації в обчислювальному пристрої ОП.

Інформація, що надходить, заноситься в ЛЧ і в ОП, де вона підсумовується з раніше накопиченою за період $T - \Delta t$ інформацією. Результат підсумовування заноситься в БП, де безперервно в міру надходження інформації порівнюється із заданою величиною, що зберігається в БЗ, і як тільки ці величини починають дорівнювати одна одній, блок порівняння БП видає сигнал в БІР для фіксації отриманого результату. Через чергові Δt відбувається зсув інформації, а інформація, що зберігається в останніх r розрядах, стирається. Таким чином, відбувається послідовний зсув інформації з кроком Δt , що відбиває перебіг процесу електроспоживання за період T і безперервне порівняння із заданою величиною.

Осереднене за час T значення електричного навантаження через кожен проміжок часу Δt надходить в БРГ2 і далі в БІР. Крім того, знову обчислене значення в БП порівнюється із раніше обчисленим найбільшим значенням, що зберігалось в БРГ2. За результатами порівняння в БРГ2 заноситься більше значення.

Розроблений пристрій випробувано на вугільних шахтах західного регіону України. На рис.5 наведено графік електричного навантаження промислової підстанції в період з 18 год. 30 хв. до 21 год. із заявленою суміщеною потужністю 2500 кВт. Існуючі пристрої зареєстрували найбільшу півгодинну потужність 2400 кВт (що менше заявленої потужності) в період з 19 год. 30 хв. до 20 год. Запропонований пристрій, що визначає потужність за методом рухомої середньої ($\Delta t = 10$ хвилин), зареєстрував найбільше значення – 2566,7кВт (що перевищує заявлену потужність) в період з 19 год. 20 хв. до 19 год. 50 хв.

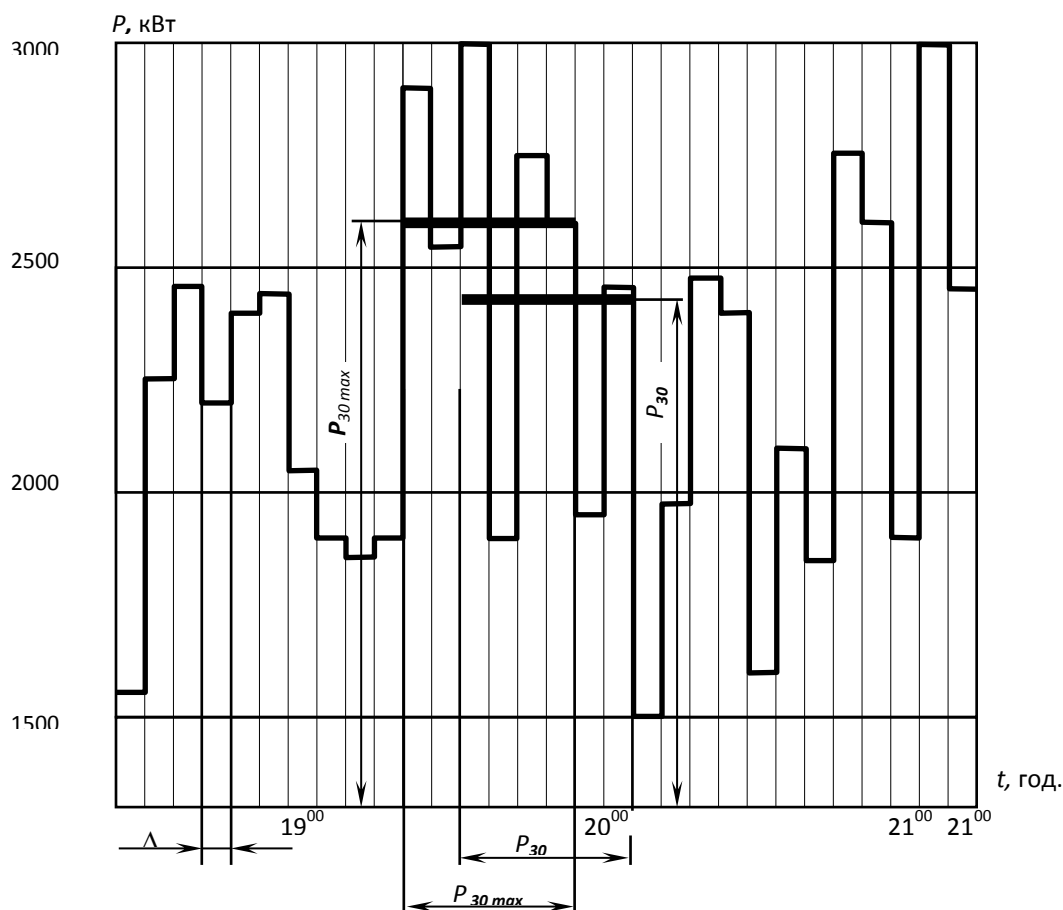


Рисунок 1 – Графік навантаження промислової підстанції

Висновок. У роботі показано, що контроль усередненої потужності на встановлених інтервалах часу не завжди дозволяє зафіксувати перевищення контрольованою величиною заданих значень. Для підвищення об'єктивності і точності контролю обґрунтовано застосування методу рухомої середньої для контролю усередненої електричної потужності із раніше визначеним кроком дискретизації.

Список використаної літератури.

1. Правила користування електричною енергією. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energy.mk.ua/index>.

2. А.с. 767656 СССР, МКІ³ G 01 R 11/56/ Автоматическое устройство для контроля совмещенной электрической нагрузки предприятия / А.В. Праховник., В.П. Калинин, С.В. Загородный, В.П. Розен (СССР). – 2647173/18-21; заявл. 24.07.78; опубл. 30.09.80. – Бюл. № 36.

3. Калинин В.П. К определению осредненной электрической мощности / Калинин В.П., Петров А.А., Калинин В.В. – Киев, 2010. – 7 с. – Деп. в ГНТБ Украины 01.11.10, № 127-Ук – 2010.

4. Калинин В.П. Выбор оптимального шага дискретизации для контроля и управления электропотреблением / Калинин В.П., Петров А.А., Волошко А.В. // «Проблемы эффективного использования энергоресурсов в промышленности». – Миасс. – 1985. – С. 162-163.

A.Voloshko, Dr. Sc. Sciences, prof., ORCID 0000-0003-3337-****

V.Kalinchyk, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4028-0185

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ON THE DEFINITION OF ELECTRIC POWER AVERAGING**

The paper examines the approaches to the control of average electric power. It is shown that the existing tools that determine the average power at set time intervals, not always fix possible excess of a certain value setpoints. Proposed practical implementation of this approach. It is shown that to monitor all exceedances with a given confidence probability, power control should be performed with a sampling rate smaller and multiple averaging interval. The practical implementation of the approach is proposed. A block diagram of the device for monitoring the averaged power by the moving average method is given. The device includes an information receiving unit, a reverse binary counter, a shift register, a computing device, registers of controlled parameters, a task unit, a comparison unit and an indicating and recording unit. The signal from the information receiving unit is fed to the input of the reverse counter. Signals with the sign "own" needs are summed up, and signals with the sign "third-party" needs are subtracted. After a certain step of sampling, the information is shifted, and the information stored in the last rows is erased. Thus, there is a sequential shift of information with a sampling step that reflects the progress of the power consumption process over the monitoring interval. Results of experimental tests at a coal mine are given.

Keywords: power averaging interval control, the moving average.

References

1. Rules electricity. [Electronic resource] - Access: <http://www.energy.mk.ua/index>.
2. А.С. № 767656 USSR, МКІ³ G 01 R 11/56 / Automatic device for monitoring the electrical load of the combined enterprise / A.V. Prakhovnik, V.P. Kalinchik, S.V. Zagorodny, V.P. Rozen (USSR). - 2647173 / 18-21; appl. 24.07.78; publ. 30.09.80. - Bull. Number 36.
3. Kalinchik V.P. By definition the averaged electric power / V.P. Kalinchik, A.A. Petrov, V.V. Kalinchik - Kiev, 2010. - 7 St.- Dep. GNTB in Ukraine 01.11.10, № 127-Uk - 2010.
4. Kalinchik V.P. Selection of the optimal sampling step to monitor and control power consumption / V.P. Kalinchik, A.A. Petrov, A.V. Voloshko // "Problems of efficient use of energy in industry" . - Miass. – 1985 – S.162-163.

УДК 621.311.153: 62 – 52

АВ. Волошко, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-3337-****

В.П. Калинин, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-4028-0185

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСРЕДНЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ**

В работе рассматриваются подходы к контролю осредненной электрической мощности. Проанализирован существующий подход, который основан на определении контролируемой мощности за фиксированные интервалы времени, в течение времени прохождения максимальной нагрузки энергосистемы. Показано, что существующие средства, которые определяют усредненную мощность на установленных интервалах времени, не всегда фиксируют возможные превышения определенной величиной заданных значений. Предложен подход для контроля осредненной мощности по методу движущейся средней. Показано, что для фиксации всех превышений с заданной вероятностью контроль мощности должен осуществляться с шагом дискретизации меньшим и кратным интервалу осреднения. Предложена практическая реализация рассматриваемого подхода. Приведена структурная схема устройства контроля осредненной мощности по методу движущейся средней. Приведены результаты экспериментальных испытаний на угольной шахте.

Ключевые слова: мощность, интервал осреднения, контроль, подвижная средняя.

Надійшла 31.01.2017

Received 31.01.2017

О.И. Александров, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-5608-8131

С.В. Домников, канд. техн. наук, доц.,

Белорусский государственный технологический университет

Д.О. Иванько, аспирант, ORCID 0000-0002-4348-6624

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ МЕТОДОМ НАИБОЛЬШЕГО ГАРАНТИРОВАННОГО РЕЗУЛЬТАТА

При ограниченном или несвоевременном снабжении топливом электростанций энергосистемы наблюдается отклонение фактических режимов эксплуатации от запланированных. В этом случае на некоторых электростанциях имеет место дефицит топлива. Тогда при коррекции режима на ближайший интервал времени в диспетчерскую службу энергосистемы должны быть переданы оценки допустимых расходов топлива на дефицитных электростанциях. Таким образом, в постановке задачи оптимального распределения активных мощностей налагаются жесткие ограничения на допустимые расходы топлива, и обеспечивается возможность выхода фактических расходов топлива на недефицитных станциях за ранее заданные пределы. В этом случае осуществляется переход от жестких ограничений по допустимым расходам топлива на недефицитных станциях к расплывчатым ограничениям. Теперь задачу целесообразно сформулировать как задачу многоцелевой оптимизации, в которой при надлежащем выборе функций принадлежности расплывчатых множеств можно с гарантией получить удовлетворительное решение.

Ключевые слова: энергосистема, снабжение топливом, оптимизация, расход топлива, жесткие ограничения, дефицит, расплывчатые множества, многокритериальность.

Введение. При планировании суточного режима электроэнергетической системы необходимо обеспечить баланс доставляемого, расходуемого и резервируемого топлива на каждой электростанции при наличии случайных, неопределенных и недостоверных данных. Эти условия выполняются при учете соответствующих ограничений в виде равенств и неравенств в однокритериальной постановке задачи. Однако, при построении математической модели, связанной с учетом напряжённых условий топливоснабжения, возникает необходимость обеспечения надежного функционирования энергосистемы при возникновении непредвиденных перебоев с доставкой топлива на отдельные станции. Целью принимаемых решений при этом оказывается минимизация расхода топлива на каждой из дефицитных станций с учетом технических, экономических и политических (директивных) указаний, т.е. модели оптимальной коррекции запланированных расходов по топливу должны быть многокритериальными.

В предлагаемой постановке задачи формулируются требования *минимизации расхода топлива на любой из электростанций, работающих в условиях дефицита топлива*, а для остальных электростанций задаются ограничения по допустимым расходам топлива. Такая формулировка задачи позволяет принимать оперативные оптимальные решения с учетом складывающейся конкретной обстановки в топливоснабжении. Предлагаемый способ формирования функции предпочтительности в отличие от известных [1,2] позволяет автоматически поставить все компоненты векторного критерия в равные условия.

Метод наибольшего гарантированного результата в задачах многоцелевой оптимизации. Одной из трудных методологических проблем при построении математических моделей принятия решений в задачах управления производственными системами является отыскание способа формализации разнообразных, реально существующих в системе целей, которой, с одной стороны, должен быть по возможности более адекватным содержательной сущности задачи, а с другой – обеспечивать возможность применения математических методов выбора наилучших решений.

Для исходной многоцелевой задачи оптимизации вида

$$F_v(\mathbf{x}) \rightarrow \max, \quad v = \overline{1, k}, \quad (1)$$

$$a_i \leq f_i(\mathbf{x}) \leq b_i, \quad i = \overline{1, l}, \quad (2)$$

где $F_v(\mathbf{x}) > 0$, $v = \overline{1, k}$, R^k – n -мерное евклидово пространство, возможны несколько принципиально различных способов построения множества допустимых решений X и отношений предпочтительности.

Многоцелевая задача оптимизации (1-2) представляет собой пример задачи принятия решений в

условиях расплывчатости (нечеткости) исходной информации, когда для любой точки евклидова пространства $\mathbf{x} \in R^n$, не существует четко определенного способа проверки, является ли эта точка искомым оптимальным решением, и в то же время наличие критериев (1) дает некоторую информацию о том, в какой степени данная точка является удовлетворительной. Математическим аппаратом, позволяющим формализовать процедуры принятия решений в условиях расплывчатости информации, является теория расплывчатых (размытых, нечетких) множеств.

В данной статье предлагается *новый способ формирования скалярной функции предпочтительности для многоцелевых задач принятия решений*, естественным образом вытекающий из представлений, характерных для теории расплывчатых множеств. Этот подход, в отличие от известных, позволяет автоматически поставить все компоненты векторного критерия оптимальности в равные условия [3].

Сведём многоцелевую задачу оптимизации (1) – (2) к задаче принятия решений в расплывчатых условиях. Каждую из целей $F_v(\mathbf{x}) \rightarrow \max, v = \overline{1, k}$, в (1) заменим расплывчатым множеством $A_v = \{\mathbf{x}, \mu_{A_v}(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in R^k\}$ с функцией принадлежности [4]:

$$\mu_{A_v}(\mathbf{x}) = \frac{F_v(\mathbf{x})}{\max_{\mathbf{x}} F_v(\mathbf{x})}, \quad v = \overline{1, k}. \quad (3)$$

Для этого необходимо предварительно решить [для определения $\max_{\mathbf{x}} F_v(\mathbf{x})$] k одноцелевых задач оптимизации вида

$$\left. \begin{aligned} F_v(\mathbf{x}) \rightarrow \max, \quad \mathbf{x} \in R^n \\ a_i \leq f_i(\mathbf{x}) \leq b_i, \quad i = \overline{1, l} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Каждое из ограничений $a_i \leq f_i(\mathbf{x}) \leq b_i, i = \overline{1, l}$, в (2) заменим расплывчатым множеством A_v с функцией принадлежности

$$\mu_{A_v}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & f_i(\mathbf{x}) < a_i; \\ 1, & a_i \leq f_i(\mathbf{x}) \leq b_i, i = \overline{1, l}, v = \overline{k+1, k+l}; \\ 0, & f_i(\mathbf{x}) > b_i \end{cases} \quad (5)$$

Соответствующая расплывчатая задача оптимизации будет иметь вид

$$\mu_c(\mathbf{x}) = \bigwedge_{v=1}^{k+l} \mu_{A_v}(\mathbf{x}) = \min_{v=1, k+l} \mu_{A_v}(\mathbf{x}) \rightarrow \max, \quad (6)$$

где \wedge – символ конъюнкции непрерывных переменных в интервале $[0, 1]$.

Решение при этом рассматривается как расплывчатое указание (инструкция) об оптимальном выборе независимых переменных в данной задаче. Наиболее целесообразным способом реализации этого указания является выбор точки \mathbf{x}^0 , в которой функция имеет максимальное значение. Эта точка называется максимизирующим решением.

Таким образом, для решения исходной нерасплывчатой многоцелевой задачи (1), (2) необходимо, помимо k задач вида (4), решить еще следующую одноцелевую задачу оптимизации:

$$\left. \begin{aligned} \varphi(\mathbf{x}) = \min_{v=1, k} [F_v(\mathbf{x}) / \max_{\mathbf{x}} F_v(\mathbf{x})] \rightarrow \max, \quad \mathbf{x} \in R^n; \\ a_i \leq f_i(\mathbf{x}) \leq b_i, \quad i = \overline{1, l}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Если \mathbf{x}^0 – решение задачи (7), а $\psi(\mathbf{x}^0)$ – соответствующее значение целевой функции, то, как ясно из (7), для каждой минимизируемой функции исходной многоцелевой задачи в точке \mathbf{x}^0 будет выполняться условие

$$F_v(\mathbf{x}^0) \geq \varphi(\mathbf{x}^0) \max_{\mathbf{x}} F_v(\mathbf{x}). \quad (8)$$

Таким образом, принятие в качестве решения задачи (1) и (2) точки \mathbf{x}^0 обеспечивает для каждой функции $F_v(\mathbf{x}), v = \overline{1, k}$, достижение уровня, составляющего не меньше чем $100 \psi(\mathbf{x}^0)\%$ её максимально возможного значения при ограничениях (2).

Оптимизация активных мощностей при дефиците топлива на отдельных электростанциях и жёстких ограничениях по допустимым расходам топлива на остальных электростанциях. Исходная многоцелевая задача формулируется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m T_i(P_i) &\rightarrow \min; \\ T_i(P_c) &\rightarrow \min, \quad i = \overline{1, l}; \\ \sum_{i=1}^m P_i - \sum_{j=1}^k p_j - \pi(P) &= 0; \\ \mathbf{P}_{\min} &\leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{\max}; \\ T_i(P_i) &\leq T_{i_{\max}}, \quad i = \overline{l+1, m}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $T_i(P_i)$, $i = \overline{1, m}$ – расходные характеристики электростанций; $\mathbf{P} = (P_i)$, $i = \overline{1, m}$, $\mathbf{p} = (p_j)$, $j = \overline{1, k}$ – векторы соответственно активных мощностей станций и нагрузок в узлах основной сети энергосистемы; $P_{i_{\min}}, P_{i_{\max}}$, $i = \overline{1, m}$ – соответственно технические минимумы нагрузки и располагаемые мощности электростанций; $T_{i_{\max}}$, $i = \overline{l+1, m}$ – допустимые расходы топлива на недефицитных по топливу станциях; $\pi(\mathbf{P})$ – потери активной мощности в основной сети (реактивные мощности в генерирующих и потребляющих узлах основной сети, а также коэффициенты трансформации в звеньях этой сети предполагаются заданными).

С учетом [3] эту задачу можно свести к одноцелевой задаче максимизации вида

$$\psi(\mathbf{P}) = \left(\frac{\min_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^m T_i P_i}{\sum_{i=1}^m T_i P_i}, \min_{i=\overline{1, l}} \frac{\min_{\mathbf{P}} T_i P_i}{T_i P_i} \right) \rightarrow \max, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m P_i - \sum_{j=1}^k p_j - \pi(\mathbf{P}) = 0; \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_{\min} \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{\max}; \quad (12)$$

$$T_i(P_i) \leq T_{i_{\max}}, \quad i = \overline{l+1, m}. \quad (13)$$

Рассмотрим физический смысл полученной задачи. Пусть $\mathbf{P}^{\text{опт}}$ – ее решение; $\psi_0 = \psi(\mathbf{P}^{\text{опт}}) \leq 1$ – соответствующее значение целевой функции. Тогда в соответствии с (10):

$$\min \sum_{i=1}^m T_i(P_i) / \sum_{i=1}^m T_i(\mathbf{P}_i^{\text{опт}}) \geq \psi_0;$$

$$\frac{\min_{\mathbf{P}} T_i(P_i)}{T_i(\mathbf{P}_i^{\text{опт}})} \geq \psi_0, \quad i = \overline{1, l}, \quad (14)$$

откуда следует, что решение задачи (10) – (13) удовлетворяет условиям

$$\Delta_0 = \sum_{i=1}^m T_i(P_i^{\text{опт}}) - \min_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^m T_i(P_i) \leq (1/\psi_0 - 1) \min_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^m T_i(P_i); \quad (15)$$

$$\Delta_i = T_i(P_i^{\text{опт}}) - \min_{\mathbf{P}} T_i(P_i) \leq (1/\psi_0 - 1) \min_{\mathbf{P}} T_i(P_i). \quad (16)$$

Как видно из (10) – (13), для формирования этой задачи необходимо предварительно последовательно решить $(i+1)$ задачу минимизации с критериями оптимизации соответственно

$$\sum_{i=1}^m T_i(P_i) \rightarrow \min; \quad (17)$$

$$T_i(P_i) \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, l}, \quad (18)$$

и ограничениями (11) – (13) у каждой из задач.

Функция $\pi(\mathbf{P})$ в общем случае имеет вид [5]:

$$\pi = [P, Q, p, q, U_0]B(P, Q, p, q, U_0)[P, Q, p, q, U_0]^*, \quad (20)$$

где \mathbf{Q}, \mathbf{q} – векторы строки реактивных мощностей в генерирующих и потребляющих узлах основной сети энергосистемы; \mathbf{p} – вектор-строка активных мощностей в потребляющих узлах основной сети; U_0 – заданное напряжение балансирующего узла; $\mathbf{B}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{p}, \mathbf{q}, U_0)$ – матрица коэффициентов потерь, причём векторы не содержат компонентов, соответствующих балансирующему узлу, а мощности в узлах потребления считаются отрицательными.

Каждую из указанных $(i+1)$ задач, как и задачу (10) – (13), можно решить любым методом математического программирования. Однако, поскольку решаемая исходная задача относится к задачам оперативной внутрисуточной оптимизации, целесообразно выбрать такой алгоритм решения совокупности задач (10) – (13) и (17) – (18), чтобы можно было получать хотя бы приближённые решения по уравнению режимами ЭЭС в условиях дефицита времени на принятие решения [6]. Одним из возможных подходов к построению диалогового процесса принятия решения является последовательная линеаризация функции (20) с использованием метода динамического программирования (МДП) для вычисления очередного приближения точки, в которой производится минимизация.

Допустим, что известен предварительный суточный график активных и реактивных мощностей электростанций, который включает в себя, естественно, и планируемый режим на рассмотренный отрезок времени, определяющий значение вектора $\dot{\mathbf{P}}$ активных мощностей станций и матрицы $\dot{\mathbf{B}}$ коэффициентов потерь, считая, что решение задачи (9), учитывающей учтённую информацию о текущей обстановке в системе топливоснабжения электростанций, лежит в небольшой окрестности точки $\dot{\mathbf{P}}$, разложим функцию $\pi(\mathbf{P})$ в ряд Тейлора, ограничиваясь линейными членами ряда:

$$\pi(\mathbf{P}) = \pi(\dot{\mathbf{P}}) + \left(\frac{\partial \pi}{\partial \mathbf{P}}\right)_0 (\mathbf{P} - \dot{\mathbf{P}})^*, \quad (21)$$

где

$$\left(\frac{\partial \pi}{\partial \mathbf{P}}\right)_0^* = 2\dot{\mathbf{B}}_p^p \dot{\mathbf{P}}^* + \dot{\mathbf{B}}_p^q \dot{\mathbf{Q}}^* + \dot{\mathbf{B}}_p^p \dot{\mathbf{p}}^* + \dot{\mathbf{B}}_p^q \dot{\mathbf{q}}^* + \dot{\mathbf{B}}_p^{U_0} U_0 \quad (22)$$

– столбец частных производных потерь по активным мощностям станций, а матрицы $\dot{\mathbf{B}}_y^x, \mathbf{x}, \mathbf{y} = \mathbf{P}, \mathbf{p}, \mathbf{q}, U_0$ – блоки матрицы $\dot{\mathbf{B}}$, строки которых соответствуют компонентам вектора \mathbf{x} , а столбцы – компонентам \mathbf{y} ; $\dot{\mathbf{x}}$ – значение вектора \mathbf{x} в запланированном режиме.

С учётом (21) – (22) ограничение (11) по балансу мощностей запишем в виде

$$\mathbf{cP}^* - d = 0, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{c} = c_i = \mathbf{e} - \left(\frac{\partial \pi}{\partial \mathbf{P}}\right)_0 > 0, \\ d = \sum_{j=1}^k p_j + \pi(\dot{\mathbf{P}}) - \left(\frac{\partial \pi}{\partial \mathbf{P}}\right)_0 \dot{\mathbf{P}}^* > 0 \end{aligned} \quad (24)$$

– постоянные параметры; \mathbf{e} – строка, состоящая из m единиц.

При замене (11) на (23), как в задаче (11) – (13), так и в задачах (17) и (15), критерии оптимальности и ограничения содержат только сепарабельные функции и для их решения можно применить метод динамического программирования [7].

Легко видеть, что для указанных задач рекуррентные соотношения Беллмана имеют следующий вид (τ ниже означает число переменных оптимизации, т.е. активных мощностей станций, на τ -м шаге прямого хода динамического программирования и одновременно – номер очередной станции в порядке их нумерации, принимаемой для прямого хода динамического программирования).

1. Задача (17) с ограничениями (23), (12), (13).

При $\tau=1$

$$\left. \begin{aligned} T_0(y, 1) &= T_1(y/c_1); \\ P_1^{\text{опт}}(y) &= y/c_1 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где

$$c_1 P_{1 \min} \leq y \leq c_1 P_{1 \max} \quad (26)$$

При $1 < \tau \leq m$

$$T_0(y, \tau) = \min_{P_\tau} [\tilde{T}_0(P_\tau, y, \tau) = T_\tau(P_\tau) + T_0(y - c_\tau P_\tau, \tau - 1)]; \quad (27)$$

$$P_\tau^{\text{опт}}(y) = \text{arg}_1 [\tilde{T}_0(P_\tau, y, \tau) = T_0(y, \tau)], \quad (28)$$

где

$$(29)$$

$$\sum_{i=1}^{\tau} c_i P_{i \min} \leq y \leq \sum_{i=1}^{\tau} c_i P_{i \max}, \quad \tau \leq l;$$

$$\sum_{i=1}^{\tau} c_i P_{i \min} \leq y \leq \sum_{i=1}^l c_i P_{i \max} + \sum_{i=l+1}^{\tau} c_i \arg [T_i(P_i) = T_{i \max}], \quad \tau > l; \quad (30)$$

$$P_{i \min} \leq P_{\tau} \leq \min(P_{\tau \max}(y - \sum_{i=1}^{\tau-1} c_i P_{i \min})/c_{\tau}), \quad \tau \leq l; \quad (31)$$

$$P_{\tau \min} \leq P_{\tau} \leq \min(\arg[T_{\tau}(P_{\tau}) = T_{\tau \max}]),$$

$$\left(y - \sum_{i=1}^{\tau-1} c_i P_{i \min} \right) / c_{\tau}, \quad \tau > l. \quad (32)$$

Записи, использованные в правых частях (30),(32), принимаются в смысле тождества $\arg [f(x) = a] = f^{-1}(a)$, а в правой части (28) – в смысле $\arg_1 [f(x_1, x_2, x_3) = a] = x_1$.

2. Задачи вида (18) с ограничениями (23), (12), (13). На первом шаге ($\tau=1$) рассматривается станция, для которой оптимизируется расход топлива в соответствии (16). При этом функция Беллмана определяется в соответствии с (24) – (26).

При $1 < \tau < m$

$$T_i(y, \tau) = \min_{P_{\tau}} [\tilde{T}_i(P_{\tau}, y, \tau) = T_i(y - c_{\tau} P_{\tau}, \tau - 1)], \quad (33)$$

а $P_{\tau}^{\text{опт}}(y)$ и ограничения на допустимые значения переменных y и P_{τ} определяется по (28) – (32).

Поскольку целью решения задач вида (18) является только определение величин

$$M_i = \min_P T_i(P_i), \quad i = \overline{1, l}, \quad (34)$$

а не соответствующих им множеств оптимальных значений векторов P , то на практике нет необходимости строить функции Беллмана для этих задач, так как M_j могут быть найдены из очевидных соотношений

$$M_i = T_i(x_i), \quad i = \overline{1, l}, \quad (35)$$

где

$$x_i = \max(P_{i \min}, (1/c_i)(d - \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq i}}^l c_v P_{v \max} - \sum_{v=l+1}^m c_v \arg [T_v(P_v) = T_{v \max}])). \quad (36)$$

Для удобства построения функции Беллмана заменим критерий (10) эквивалентным ему критерием

$$\max \left(\left(\sum_{i=1}^m T_j(P_i)/M_0, \quad \max_{i=\overline{1, l}} (T_i(P_i)/M_i) \right) \right) \rightarrow \min, \quad (37)$$

где

$$M_0 = \min_P \sum_{i=1}^m T_i(P_i). \quad (38)$$

При построении на прямом ходе динамического программирования искомой функции Беллмана необходимо также строить две вспомогательные функции Беллмана $F_0(y, \tau)$ и $F_1(y, \tau)$, соответствующие задачам минимизации

$$\left(\sum_{i=1}^m T_i(P_i) \right) / M_0 \rightarrow \min \quad (39)$$

при ограничениях (23), (12), (13) и

$$\max_{i=\overline{1, l}} (T_i(P_i)/M_i) \rightarrow \min \quad (40)$$

при тех же ограничениях.

При $\tau = 1$

$$F_0(y, 1) = T_0(y, 1)/M_0; \quad (41)$$

$$F_1(y, 1) = T_1(y, 1)/M_1; \quad (42)$$

$$F(y, 1) = \max F_0(y, 1), F_1(y, 1) = T_1(y/c_1)/M_1 \quad (43)$$

а $P_1^{\text{опт}}(y)$ и ограничения на переменную y определяются по (25), (26).

При $1 < \tau < m$

$$F_0(y, \tau) = T_0(y, \tau)/M_0 \quad (44)$$

$$F_1(y, \tau) = \min \max (T_\tau(P_\tau)/M_\tau, F_1(y - c_\tau P_\tau, \tau - 1)); \quad (45)$$

$$F_1(y, \tau) = \min[F(P_\tau, y, \tau) = \max(\frac{T_\tau(P_\tau)}{M_\tau} + F_0(y - c_\tau P_\tau, \tau - 1), \max(\frac{T_\tau(P_\tau)}{M_\tau} \quad (46)$$

$$P_\tau^{\text{опт}}(y) = \arg_1[F(P_\tau, y, \tau)], \quad (47)$$

Причем ограничения на переменные y и P_τ определяются в соответствии с (29) - (32).

Опишем теперь обратный ход динамического программирования для вспомогательной задачи (17) и основной задачи (10). Для любой из них он состоит в том, что компоненты $\tilde{P}_i, i = \overline{1, l}$, вектора, являющегося решением задачи, определяются в обратном порядке их следования как

$$\left. \begin{aligned} \tilde{P}_m &= P_m^{\text{опт}}(d), \quad \overline{P}_{m-1} = P_{m-1}^{\text{опт}}(d - c_m \tilde{P}_m), \\ \tilde{P}_1 &= P_1^{\text{опт}}(d - \sum_{\tau=2}^m c_\tau \tilde{P}_\tau), \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

где $P_\tau^{\text{опт}}, \tau = \overline{1, m}$ - значения функций $P_\tau^{\text{опт}}(y)$, построенных на прямом ходе.

Теперь, принимая $\dot{P} = \tilde{P}$ и повторяя описанные вычисления, можно уточнять получаемые решения столько раз, сколько практически возможно при располагаемом времени для решения задачи. Возможны и другие подходы к построению диалоговых процессов на основе МДП, не требующие линеаризации (20), однако ввиду ограниченного объема статьи они здесь не рассматриваются.

Постановка и решение задачи при жестких ограничениях. Если в результате решения задачи оперативной оптимизации активных мощностей в энергосистеме, содержащей требования минимизации расходов топлива на отдельных электростанциях, испытывающих трудности со своевременной доставкой топлива, выясняется, что нагрузка энергосистемы не может быть покрыта при фактических ресурсах топлива на этих станциях, то необходимо в новой постановке задачи наложить жесткие ограничения на допустимые расходы топлива для дефицитных станций и обеспечить возможность выхода фактических расходов топлива на недефицитных станциях за ранее заданные пределы. Последнее достигается переходом от жестких ограничений по допустимым расходам топлива на недефицитных станциях к расплывчатым ограничениям.

Функции принадлежности, определяющие расплывчатые множества соответствующие ограничениям на допустимые расходы топлива на недефицитных электростанциях, как следует из (5), должны удовлетворять условиям:

$$P_v \geq P_v \min, T_v(P_v) \leq T_v \max \rightarrow \mu_v(P_v) = 1; \quad (49)$$

$$T_v(P_v) < T_v \max \rightarrow 0 \leq \mu_v(P_v) < 1; \quad (50)$$

$$P'_v < P''_v \leq P_v \max, T_v(P'_v) > T_v \max \rightarrow \mu_v(P'_v) > \mu_v(P''_v), \quad (51)$$

$$T_v \max < T_v(P_v \max) \rightarrow \mu_v(P_v \max) = 0, \quad v = \overline{1, m-l}, \quad (52)$$

где $\mu_v(P_v)$ - функция принадлежности расплывчатого множества, а запись $A \rightarrow B$ означает, что утверждение B логически вытекает из A .

Условиям (49) - (52) удовлетворяют, в частности, функции принадлежности вида

$$\mu_v(P_v) = \begin{cases} 1 & \text{при } T_v(P_v) \leq T_v \max; \\ \frac{P_v \max - P_v}{P_v \max - \arg[T_v(P_v) = T_v \max]} \exp\left(\frac{T_v(P_v) - T_v \max}{T_v \max} \frac{r}{k_v}\right) & \text{при } A_v(P_v) \leq T_v \max, \\ 0 & \text{при } P_v \leq P_v \max; v = 1, \end{cases} \quad (53)$$

где $r \geq 1$ -- общий для всех дефицитных электростанций параметр, подбираемый разработчиком данной задачи на стадии ее проектирования для конкретной энергосистемы; $0 \leq k_v \leq 1$ - параметр, задаваемый пользователем при решении задачи, имеющий смысл значения истинности в непрерывной логике [8] утверждения "v-я станция может изыскать дополнительные ресурсы топлива" с точки зрения пользователя.

Второй этап расчета по отношению к задаче (9) заключается в решении следующей расплывчатой задачи оптимизации:

$$\sum_{i=1}^m T_i(P_i) \rightarrow \min; \quad (54)$$

$$T_i(P_i) \rightarrow \min. \quad i = \overline{1, l}; \quad (55)$$

$$\sum_{i=1}^m P_i - \sum_{j=1}^k p_j - \pi(\mathbf{P}) = 0 \quad (56)$$

$$\mathbf{P}_{\min} \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{\max}; \quad (57)$$

$$T_i(P_i) \leq \bar{T}_l, \quad i = \overline{1, l}; \quad (58)$$

$$\{(P_v, \mu_v(P_v)) | P_v \in R\}, \quad v = \overline{l+1, m} \quad (59)$$

где $\bar{T}_l = T_{i \max}$, $i = \overline{1, l}$, – фактический ресурс топлива на i -й электростанции.

Обозначим через $A_0 = \{(\mathbf{P}, \mu_{A_0}(\mathbf{P}))\}$, $A_i = \{(\mathbf{P}, \mu_{A_i}(\mathbf{P}))\}$, $i = \overline{1, l}$, расплывчатые множества, которые согласно ранее изложенному можно эквивалентным образом поставить в соответствие условиям минимизации (54) и (55), где $\mu_{A_i}(i = \overline{0, l})$ определяются в соответствии с (3). Тогда максимизирующее решение стандартной расплывчатой задачи оптимизации, соответствующей (54) – (59), определяется из условия.

$$\left(\bigwedge_{i=0}^l \mu_{A_i}(\mathbf{P}) \right) \bigwedge \left(\bigwedge_{v=l+1}^m \mu_v(\mathbf{P}) \right) \rightarrow \max \quad (60)$$

при ограничениях (57) и (58), $\mu_v(\mathbf{P})$, $v = \overline{l+1, m}$, где находятся по правилу

$$\mathbf{P} = (P_1, P_2, \dots, P_v, \dots, P_m) \rightarrow \mu_v(\mathbf{P}) = \mu_v(P_v) \quad (61)$$

С учетом способа определения функций принадлежности $\mu_{A_i}(\mathbf{P})$, $i = \overline{0, l}$ задача (60) сводится к

$$\min \left(\frac{\min_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^m T_i P_i}{\sum_{i=1}^m T_i P_i}, \quad \min_{i=\overline{1, l}} \frac{\min_{\mathbf{P}} T_i P_i}{T_i P_i}, \quad \min_{v=\overline{l+1, m}} \mu_v(P_v) \right) \rightarrow \max; \quad (62)$$

$$\sum_{i=1}^m P_i - \sum_{j=1}^k p_j - \pi(P) = 0; \quad (63)$$

$$\mathbf{P}_{\min} \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{\max} \quad (64)$$

$$T_i(P_i) \leq \bar{T}_l, \quad i = \overline{1, l} \quad (65)$$

Тем самым исходная многоцелевая задача оптимизации (54) – (59) сводится к одноцелевой. Для формирования последней, в частности, для определения констант

$$M_0 = \min_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^m T_i(P_i), \quad M_i = \min_{\mathbf{P}} T_i(P_i), \quad i = \overline{1, l}, \quad (66)$$

необходимо, как и ранее, решить $l+1$ соответствующих одноцелевых задач оптимизации, но с дополнительными ограничениями вида (65) и при отсутствии ограничений по допустимым расходам топлива на недефицитных электростанциях. Практически, так же как было показано выше, задачу оптимизации нужно решать только для определения M_0 , а M_i вычисляются тривиально. Необходимые видоизменения по сравнению с задачей (10) – (13) состоят в следующем.

При определении M_0 модифицируется определение функции Беллмана $T_0(y, \tau)$, требующей при использовании метода динамического программирования.

При $\tau = 1$

$$T_0(y, 1) = T_1(y/c_1); \quad (67)$$

$$P_1^{\text{опт}}(y) = y/c_1; \quad (68)$$

$$c_1 P_{1 \min} \leq y \leq c_1 \arg[T_1(P_1 = \bar{T}_1)]. \quad (69)$$

При $1 < \tau \leq m$

$$T_0(y, \tau) = \min_{P_\tau} [\bar{T}_0(P_\tau, y, \tau) = T_\tau(P_\tau) + T_0(y - c_\tau P_\tau, \tau - 1)]; \quad (70)$$

$$P_\tau^{\text{opt}}(y) = \arg_1[\bar{T}_0(P_\tau, y, \tau) = T_0(y, \tau)] \quad (71)$$

$$\sum_{i=1}^{\tau} c_i P_{i \min} \leq \sum_{i=1}^{\tau} c_i \arg[T_i P_i = \bar{T}_i] \cdot \tau \leq l; \quad (72)$$

$$\sum_{i=1}^{\tau} c_i P_{i \min} \leq \sum_{i=1}^l c_i \arg[T_i P_i = T_i] + \sum_{i=l+1}^{\tau} c_i P_{i \max}, \tau > l; \quad (73)$$

$$P_{\tau \min} \leq P_\tau \leq \min(\arg[T_\tau(P_\tau) = \bar{T}_\tau],$$

$$\left(y - \sum_{i=1}^{\tau-1} c_i P_{i \min} / c_\tau \right), \quad \tau \leq l; \quad (74)$$

$$P_{\tau \min} \leq P_\tau \leq \min(P_{\tau \min}, \left(y - \sum_{i=1}^{\tau-1} c_i P_i / c_\tau \right)), \quad \tau > l; \quad (75)$$

Компоненты M_i , $i = \overline{1, l}$, определяются как $M_i = T_i(x_i)$, где

$$x_i = \max \left(P_{i \min}, \left(d - \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq i}}^l c_v \arg[T_v(P_v) = \bar{T}_v] - \sum_{v=l+1}^m c_v P_{v \min} / c_i \right) \right) \quad (76)$$

Построенная функция $T_0(y, \tau)$ может быть, как и в случае задачи (10) – (13), использована для построения функции Беллмана $F(y, \tau)$, соответствующей решению задачи (62) – (65) методом динамического программирования, для чего целесообразно критерий (62) заменить эквивалентным ему критерием

$$\max \left(\left(\sum_{i=1}^m T_1(P_1) \right) / M_0, \quad \max_{i=1, l} (T_i P_i / M_i), \quad \max_{i=l+1, m} 1 / \mu_v(P_v) \right) \rightarrow \min \quad (77)$$

а ограничения (64) заменить на

$$\begin{cases} P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}, & i = \overline{1, l} \\ P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}, & i = \overline{l+1, m}, \end{cases} \quad (78)$$

где $\varepsilon > 0$ – положительное число, меньшее, чем шаг по $P_\tau, \tau = \overline{1, m}$, при прямом ходе динамического программирования. При построении искомой функции Беллмана $F(y, \tau)$ для задачи (77) с ограничениями (63), (78), (65) необходимо также строить на прямом ходу динамического программирования две вспомогательные функции Беллмана $F_0(y, \tau)$ и $F_1(y, \tau)$, соответствующие задачам минимизации [9]:

$$\sum_{i=1}^m T_1(P_1) / M_0 \rightarrow \min \quad (79)$$

$$\text{при ограничениях (63), (78), (65) и } \max_{i=1, l} (T_i(P_i) / M_i), \max_{i=l+1, m} 1 / \mu_v(P_v) \rightarrow \min \quad (80)$$

при тех же ограничениях.

$$\text{При } \tau = 1: F_0(y, 1) = T_0(y, 1) / M_0 \quad (81)$$

$$F_0(y, 1) = T_0(y, 1) / M_1; \quad (82)$$

$$F(y, 1) = \max F_0(y, 1), \quad F_1(y, 1) = T_1(y/c_1)/M_1 \quad (83)$$

а $P_\tau^{\text{опт}}(y)$ и ограничения на переменную y определяются по (68) и (69).

$$\text{При } 1 < \tau \leq m: \quad F_0(y, \tau) = T_0(y, \tau)/M_0 \quad (84)$$

$$F_1(y, \tau) = \min_{P_\tau} \max(T_\tau(P_\tau)/M_\tau, \quad F_1(y - c_\tau P_\tau, \tau - 1)); \quad \tau \leq l \quad (85)$$

$$F_1(y, \tau) = \min_{P_\tau} \max(T_\tau(P_\tau)/M_\tau, \quad 1/\mu_\tau(P_\tau), \quad F_1(y - c_\tau P_\tau, \tau - 1)), \quad \tau > l; \quad (86)$$

$$F(y, \tau) = \min_{P_\tau} [\tilde{F}(P_\tau, y, \tau) = \max T_\tau(P_\tau)/M_0 + F_0(y - c_\tau P_\tau, \tau - 1), \max T_\tau(P_\tau)/M_\tau, \quad F_1(y - c_\tau P_\tau, \tau - 1)], \quad \tau \leq l; \quad (87)$$

$$F(y, \tau) = \min_{P_\tau} [\tilde{F}(P_\tau, y, \tau) = \max T_\tau(P_\tau)/M_0 + F_0(y - c_\tau P_\tau, \tau - 1), \max T_\tau(P_\tau)/M_\tau, \quad 1/\mu_\tau(P_\tau), F_1(y - c_\tau P_\tau, \tau - 1)], \quad \tau > l; \quad (88)$$

$$P_\tau^{\text{опт}}(y) = \arg_1[\tilde{F}(P_\tau, y, \tau) = F(y, \tau)] \quad (89)$$

а ограничения на переменные y и P_τ при $\tau \leq l$ определяются соответственно по (72), (74), в противном случае ($\tau > l$):

$$\sum_{i=1}^{\tau} c_i P_{i \min} \leq y \leq \sum_{i=1}^l c_i \arg[T_i P_i = \bar{T}_l] + \sum_{i=l+1}^{\tau} c_i (P_{i \max} - \varepsilon), \quad (90)$$

$$P_{\tau \min} \leq P_\tau \leq \min(P_{\tau \max} - \varepsilon, (y - \sum_{i=1}^{\tau-1} c_i P_{i \min})/c_\tau). \quad (91)$$

Обратный ход динамического программирования выполняется в соответствии с (48).

Оптимальный суточный режим при заданных суточных расходах топлива на $n \leq m$ электростанциях можно определить следующим образом:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{\tau=1}^{24} B_i^{(\tau)} (P_i^{(\tau)}) + \sum_{j=1}^n \lambda_j (\sum_{\tau=1}^{24} B_j^{(\tau)} (P_j^{(\tau)}) - B_j^{\text{сум}}) \rightarrow \min; \quad (92)$$

$$\sum_{i=1}^m P_i^{(\tau)} = \sum_{v=1}^k p_v^{(\tau)} + \pi^{(\tau)}, \quad \tau = \overline{1, 24}; \quad (93)$$

$$P_{i \min}^{(\tau)} \leq P_i^{(\tau)} \leq P_{i \max}^{(\tau)}, \quad i = \overline{1, m}, \tau = \overline{1, 24}. \quad (94)$$

Эту задачу можно рассматривать как решение системы уравнений

$$F(\lambda) = 0, \quad (95)$$

где $F = (F_1, F_2, \dots, F_n), F_j = \sum_{\tau=1}^{24} B_j^{(\tau)} (P_j^{(\tau)}(\lambda) - B_j^{\text{сум}}), j = \overline{1, n},$

а $P_j^{(\tau)}(\lambda), j = \overline{1, n},$ определяются при заданном векторе λ путём решения задачи оптимизации с учётом потерь, но при замене фактических расходных характеристик станций $B_j^{(\tau)}(P_j^{(\tau)}), j = \overline{1, n},$ модифицированными характеристиками

$$B_j^{(\tau)}(P_j^{(\tau)}) = \lambda \left(B_j^{(\tau)}(P_j^{(\tau)}) - \frac{B_j^{\text{сум}}}{24} \right) + B_j^{(\tau)}(P_j^{(\tau)}).$$

Система (95) обычно решается методом Ньютона [10]. Однако, такой путь решения задачи имеет следующие недостатки: а) итерационный процесс метода Ньютона основан на вычислении на каждом шаге процесса матрицы частных производных $F'(\lambda)$, хотя нет гарантии, что вектор-функция $F(\lambda)$ является дифференцируемой во всех точках; б) итерационный процесс метода Ньютона даже при

дифференцируемой функции $F(\lambda)$ не всегда сводится к решению уравнения (95) если вектор начального приближения $\lambda(0)$ выбран далеко от искомого решения λ^{opt} . Поэтому более целесообразно использовать для решения задачи (92)-(94) алгоритм, в котором решение системы уравнений $F(\lambda) = 0$ заменено эквивалентным уравнением оптимизации по вектору λ , что позволяет использовать при оптимизации вычислительные методы, которые, во-первых, не требуют вычислений производных $F'(\lambda)$, а во-вторых, обладают хорошей сходимостью.

Эквивалентную замену уравнения (95) можно выполнить следующим образом. Вместо (95) требуем

$$\Phi(\lambda) = (F(\lambda))^2 \rightarrow \min.$$

Действительно, $\Phi(\lambda) \geq 0$,

и если существует, по предложению, λ , при котором $F(\lambda) = 0$, то

$$\min_{\lambda} \Phi(\lambda) = 0.$$

С другой стороны, если при $\lambda = \lambda^{opt}$ достигает минимума $\Phi(\lambda)$, т.е.

$$\min_{\lambda} \Phi(\lambda) = \Phi(\lambda^{opt}),$$

то

$$\Phi(\lambda^{opt}) = 0, \quad a(\lambda^{opt}) = 0,$$

т.е. λ^{opt} является решением системы (95). Таким образом, для задачи (92)-(94) можно построить следующий двухуровневый оптимизационный алгоритм:

1. На верхнем уровне решается задача оптимизации по вектору λ :

$$(F(\lambda))^2 \rightarrow \min. \tag{96}$$

2. При очередном приближении λ к искомому решению задачи (96) решается задача оптимизации по вектору P :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \sum_{\tau=1}^{24} B_i^{(\tau)}(P_i^{(i)}) &\rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^m P_i^{(i)} &= \sum_{v=1}^k p_v^{(\tau)} + \pi^{(\tau)}, \quad \tau = \overline{1, 24}; \\ P_{i \min}^{(\tau)} &\leq P_i^{(\tau)} \leq P_{i \max}^{(\tau)}, \quad i = \overline{1, m}, \tau = \overline{1, 24}; \end{aligned}$$

где

$$\bar{B}_i^{(\tau)}(P_i^{(\tau)}) = \begin{cases} B_i^{(\tau)}(P_i^{(\tau)}), & i = \overline{1, n}, \\ B_i^{(\tau)}(P_i^{(\tau)}), & i = \overline{n+1, m} \end{cases}.$$

Этот двухуровневый алгоритм можно изобразить в виде следующей блок-схемы рис.1:

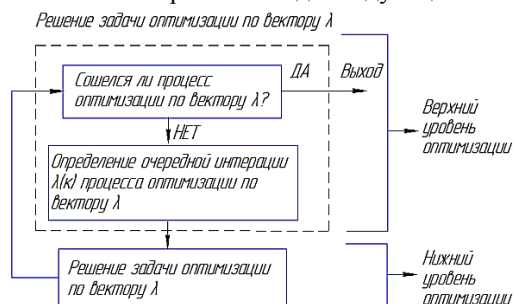


Рисунок 1 – Двухуровневый алгоритм

Между тем, в действительности трудно заранее отобразить все многообразие интуитивных предпочтений специалиста с помощью любой жестко фиксированной связи между количественными показателями, характеризующими различные цели сложной производственной системы. В настоящее время разработан [7, 9] математический аппарат диалоговой оптимизации, позволяющий формализовать любые субъективные предпочтения в виде отношения линейного порядка на множестве допустимых решений и построены алгоритмы выбора наиболее предпочтительного решения, основанные на диалоге человека и компьютера.

Выводы:

1. Каждый из рассмотренных методов согласования скалярных критериев в многоцелевых задачах оптимизации опирается на некоторые априорные предположения, которыми дополняется исходная формулировка многоцелевой задачи на основе субъективных соображений об относительной степени важности критериев, после чего отношение предпочтительности на множестве допустимых решений задачи оказывается жестко зафиксированным.

2. Многоцелевая задача оптимизации в сочетании с расплывчатой задачей оптимизации образуют математическую модель для организации двухэтапной диалоговой процедуры принятия оперативных решений при срыве поставок топлива на некоторых электростанциях энергосистемы.

3. Предлагаемая постановка задачи позволяет построить алгоритм, который гарантирует принятие удовлетворительного решения при недостоверной исходной информации в условиях возникновения непредвиденного дефицита топлива на отдельных станциях.

4. Двухуровневый оптимизационный алгоритм позволяет решить задачу оптимизации суточного режима энергосистемы путем использования перестроенных модифицированных характеристик.

Список использованной литературы

1. Нурминский Е.А. Численные методы решения детерминированных и стохастических минимаксных задач. - Киев, Наукова думка, 1979.
2. Габасов Р., Кириллова Ф.М. Методы оптимизации. - Минск: Изд. БГУ им. В.И. Ленина. – 1975. – 279 с.
3. Гурский С.К., Домников С.В. Распределение активной мощности методом гарантированного относительного уровня. – Электричество. – 1982, №9. – С. 10-14.
4. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях. - В кн.: Вопросы анализа и процедур принятия решений. - М.: Мир, 1976. – 165 с.
5. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов/ Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высшая школа, 1973.- 344 с.
6. Anders, G.J. Probability Concept in Electric Power Systems. – N.Y.: Wiley, 1990. – 682 p.
7. Рыков А.С. Методы системного анализа: многокритериальная и нечеткая оптимизация, моделирование и экспертные оценки. – М.: Экономика, 1999. – 192 с.
8. Александров О.И., Домников С.В. Методы анализа текущих ремонтных отключений основного оборудования в сложной электроэнергетической системе. Минск: Технопринт, 2001. – 260 с.
9. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений. Уч. пособие. СПб.: Изд. политехн. ун-та, 2014. – 176 с.
10. Секретарев Ю.А., Мятаж Т.В., Мошкин Б.Н. Оптимизация режимов работы генерирующей компании на базе ТЭЦ по выработке электроэнергии на основе критерия максимизации прибыли. Электромеханика. (Известия ВУЗов). – 2016, №4. – С. 82 – 87.

O. Alexandrov, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2813-3692

S. Domnikov, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-5518-5802

Belarusian state technological university

D. Ivanko, Ph.D. student , **ORCID** 0000-0003-2813-3692

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

OPTIMIZATION OF THE MODE OF A POWER SUPPLY SYSTEM BY METHOD OF THE GREATEST GUARANTEED RESULT

At limited or untimely supply by fuel of power stations of a power supply system the deviation of actual modes of operation from planned is observed. In this case on some power stations deficiency of fuel takes place. Then at correction of a mode on the nearest interval of time in dispatching service of a power supply system assessments of admissible expenses of fuel on hard-to-get power stations should be passed. Thus, under direction of a problem of optimum distribution of active capacities rigid restrictions on admissible expenses of fuel are imposed and to provide a possibility of an output of actual expenses of fuel on not difficult to receive stations for earlier limits established. In this case transition from rigid restrictions on admissible expenses of fuel at not hard-to-get stations to indistinct restrictions is carried out. Now a problem expediently to state as a problem of multi-purpose optimization in which at an appropriate choice of functions of an accessory of indistinct sets it is possible to receive the satisfactory decision with a guarantee.

Keywords: power supply system, supply with fuel, optimization, fuel consumption, rigid restrictions, deficiency, indistinct sets, multicriteria.

Надійшла 01.02.2017

Received 01.02.2017

В.А. Попов, д.т.н., проф., ORCID 0000-0003-3484-4597

Р.А. Романюк, магистр

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

УЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

При решении задач планирования режимов в существующих системах электроснабжения неизбежно сталкиваются с необходимостью учета неопределенности информации. Более того, значимость данного фактора усиливается в предположении появления в структуре электрических сетей источников распределенной генерации, особенно, если они ориентированы на использование возобновляемой энергии. При этом очевидно, что эффективность и характер воздействия на режимы электрических сетей внедряемых источников генерации во многом зависят от их параметров и мест локализации. В этих условиях практический интерес представляет сравнительная оценка различных вариантов внедрения средств распределенной генерации с точки зрения их влияния на такие показатели режима электрической сети как потери и качество электроэнергии, надежность электроснабжения. Так как указанные показатели имеют различную физическую природу, то невозможно их представить единой комплексной характеристикой, например, экономического характера. В связи с этим в статье для выбора оптимального варианта применения распределенной генерации осуществлена модификация одного из методов многокритериального сравнения альтернатив для условий, когда ряд режимных характеристик представлены нечеткими количественными и качественными величинами в виде нечетких множеств.

Ключевые слова: распределенная генерация, неопределенность информации, многокритериальное сравнение альтернатив.

Введение

Широкое применение распределенной генерации является сегодня общепринятой тенденцией развития современной электроэнергетики. Вместе с тем реализация подобных проектов часто сталкивается со значительными организационными и техническими сложностями, отсутствием необходимого правового и нормативного обеспечения, что в ряде случаев может спровоцировать определенный конфликт интересов между потенциальными инвесторами и энергокомпаниями. Помимо этого внедрение распределенной генерации требует значительных инвестиций, где помимо средств на приобретение и монтаж самого генерирующего оборудования необходимо учитывать и затраты, связанные с выполнением выдаваемых энергокомпаниями технических условий на подключение данных устройств к электрическим сетям энергосистемы, которые во многих случаях бывают необоснованно усложненными. Это объясняется тем, что энергокомпании опасаются возможности негативного влияния подключаемого оборудования на режимы находящихся под их оперативным контролем электрических сетей, усложнения управления их работой. В связи с этим при определении точечных решений относительно применения распределенной генерации интерес представляет выбор из ряда альтернативных вариантов того, который помимо интересов инвестора будет учитывать характер и степень влияния подключаемых генерирующих источников на технико-экономические показатели работы существующих электрических сетей.

Традиционно в качестве основных показателей, характеризующих эффективность работы электрических сетей, рассматриваются: величина потерь электрической энергии, надежность электроснабжения и качество электрической энергии. Все перечисленные показатели имеют различную физическую природу и единицы измерения. Более того, при этом отсутствует нормативный показатель, характеризующий качество электрической энергии в плане соблюдения нормируемых уровней отклонения напряжения, а согласно стандартам IEEE надежность электроснабжения отражается рядом показателей. Все это делает невозможным использование единого критерия экономического характера достаточно адекватно отражающего последствия применения распределенной генерации на режимы электрических сетей для возможности технико-экономического сравнения различных вариантов их применения. Указанные обстоятельства требуют применения в данном случае методов многокритериального сравнения альтернатив.

Помимо этого опыт эксплуатации отечественных энергосистем показывает, что в настоящее время объективная оценка указанных выше показателей режима невозможна без учета объективно существующей неопределенности информации, особенно когда речь идет о распределительных электрических сетях [1]. В значительной мере это связано с отсутствием необходимых данных для достоверной оценки электрических нагрузок как отдельных потребителей, так и узлов сети в целом, которые лежат в основе определения указанных показателей режима. Дополнительно неопределенность информации усиливается вследствие появления в структуре распределительных сетей альтернативных источников энергии, функционирование которых зависит от многих труднопрогнозируемых внешних факторов. Таким образом, корректный учет неопределенности информации, особенно в современных системах электроснабжения с интегрированными в них разнообразными по своей природе источниками распределенной генерации, является принципиальным условием для возможности адекватного определения широкого спектра показателей, отражающих различные технико-экономические характеристики работы данных систем.

Цель и задачи

Учитывая приведенные соображения, основной целью данных исследований является постановка и решение двух взаимосвязанных задач. Первая из них заключается в разработке общей методики моделирования нагрузок узлов распределительной сети и определения на их основе таких показателей режима, как потери электрической энергии, ожидаемая величина недоотпущенной электроэнергии, а также оценки режима напряжений в условиях применения распределенной генерации. Вторая задача связана с адаптацией одного из методов многокритериального сравнения альтернатив к условиям, когда оценочные характеристики альтернативных вариантов внедрения средств распределенной генерации заданы нечеткими величинами количественного и качественного характера.

Материал и результаты исследований

В ряде проведенных исследований было показано, каким образом неопределенность информации может быть эффективно учтена, в частности, при моделировании режимов электрических сетей, в том числе в условиях наличия в их структуре альтернативных источников энергии. Для данной цели предлагается использовать математический аппарат теории нечетких множеств. В этом случае, как, например, показано в работах [2, 3], значения нагрузок могут быть представлены нечеткими числами, в частности, $L-R$ типа [4]. Очевидно, что при этом и все вычисляемые на их основе интегральные показатели (например, такие, как потери мощности и электрической энергии) также будут описываться аналогичными нечеткими числами.

В исследованиях представленных в [5] продемонстрировано, каким образом вопросы надежности электроснабжения могут быть учтены при использовании средств распределенной генерации. Говорить о повышении надежности электроснабжения в указанных условиях целесообразно только в том случае, если имеется техническая возможность задействовать в послеаварийном режиме генерирующие источники для электроснабжения определенной выделенной нагрузки. Очевидно, что реализация подобных проектов чаще всего требует применения достаточно дорогостоящих автоматических коммутационных аппаратов типа реклоузеров. Более того, количество и размещение указанных аппаратов должно быть тщательно согласовано с существующей стратегией секционирования распределительной сети. В этих условиях эффект от внедрения распределенной генерации может быть оценен определенным удельным показателем, отражающим степень изменения некоторой интегральной характеристики надежности (например, ожидаемой величины недоотпущенной электроэнергии) на единицу вложенных средств. В условиях существующего информационного обеспечения указанная характеристика (которая определяется на основании значения средних значений нагрузок узлов сети), скорее всего, будет иметь нечеткий характер и, следовательно, также может быть представлена нечетким множеством, в частности, $L-R$ типа (рис.1).

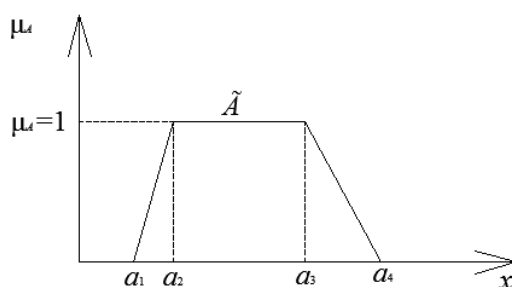


Рисунок 1 – Характеристики трапециевидальной функции принадлежности

Для оценки качества электрической энергии, в частности, допустимости отклонений напряжения не существует объективной количественной оценки. С другой стороны, появление в структуре систем электроснабжения источников распределенной генерации, может принципиально различно повлиять на режим напряжений, в зависимости от параметров интегрируемых источников, их режимов работы и точек подключения в электрические сети. Подключение генерирующих источников может разгрузить распределительные сети и, тем самым, снизив в них потери напряжения, обеспечит допустимые уровни их отклонений на зажимах электроприемников, даже, если в исходном режиме данные требования и не соблюдались. В отдельных случаях для достижения положительного эффекта необходимо изменить параметры работы средств централизованного регулирования напряжения. И, наконец, возможны ситуации, когда распределенная генерация, даже при корректировке режимов работы средств регулирования напряжения, приводит к появлению недопустимых отклонений напряжения у некоторых групп потребителей, в частности по причине нарушения однородности графиков нагрузок отдельных распределительных линий, что не позволяет выбрать приемлемый закон регулирования напряжения. В связи с этим для оценки влияния распределенной генерации на режим напряжений могут быть использованы определенные лингвистические оценки, задаваемые экспертным путем и описываемые соответствующими функциями принадлежности, формируемыми, например, по аналогии с [6].

Таким образом, на стадии сравнения альтернативных вариантов применения распределенной генерации складывается ситуация при которой любая альтернатива будет характеризоваться тремя оценочными характеристиками (целевыми функциями) и при этом каждая из них будет представлена нечеткими величинами с трапециевидными функциями принадлежности. В этих условиях возникает необходимость в разработке метода многокритериального сравнения альтернатив при нечетком задании исходных данных. Ниже рассмотрена процедура адаптации метода VIKOR [7] к указанным условиям.

Первоначально исходные данные представляются в форме, так называемой, матрицы решений, где строки соответствуют рассматриваемым альтернативам, а столбцы отражают критерии (частные целевые функции C_1, \dots, C_n), значения которых заносятся в соответствующие ячейки.

$$D = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} & \dots & \tilde{A}_{1n} \\ A_2 & \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} & \dots & \tilde{A}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_m & \tilde{A}_{m1} & \tilde{A}_{m2} & \dots & \tilde{A}_{mn} \end{matrix} \quad (1)$$

При этом все оценки альтернатив будут характеризоваться нечеткими величинами (рис), которые описываются следующим образом

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{если } x \in (a_1, a_2) \\ \mu_A, & \text{если } x \in (a_2, a_3) \\ \frac{x - a_4}{a_3 - a_4}, & \text{если } x \in (a_3, a_4) \\ 0, & \text{если } x \in (-\infty, a_1) \cup (a_4, \infty). \end{cases} \quad (2)$$

Проводим нормализацию значений рассматриваемых критериев, учитывая правила выполнения арифметических операций с нечеткими числами [8], что осуществляется следующим образом
- для критериев предполагающих максимизацию

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{a_{ij1}}{m_i}, \frac{a_{ij2}}{m_i}, \frac{a_{ij3}}{m_i}, \frac{a_{ij4}}{m_i}, \mu_{ij} \right), \quad (3)$$

где $m_i = \max_i a_{ij4}$;

- для критериев требующих минимизации

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{n_i}{a_{ij4}}, \frac{n_i}{a_{ij3}}, \frac{n_i}{a_{ij2}}, \frac{n_i}{a_{ij1}}, \mu_{ij} \right), \quad (4)$$

где $n_i = \min_i a_{ij1}$.

Определяем наилучшее (\tilde{V}_i^+) и наихудшее (\tilde{V}_i^-) значения для всех рассматриваемых целевых функций (критериев) $i = 1, \dots, m$, учитывая их характер (т.е. принимая во внимание подлежит ли данный критерий максимизации или минимизации).

Для всех элементов нормализованной матрицы решений, элементы которой определены в соответствии с (1), (2) находим детерминированные аналоги, представляемые центрами тяжести соответствующих нечетких множеств, на основе следующих выражений

$$y_a = \frac{\mu_a \left(\frac{a_3 - a_2}{a_4 - a_1} \right) + 2}{6}, \quad (5)$$

$$x_a = \frac{y_a(a_2 + a_3) + (a_1 + a_4)(\mu_a - y_a)}{2\mu_a}. \quad (6)$$

Вычисляем расстояния между всеми элементами матрицы решений относительно наилучшего и наихудшего решений. При этом исходим из того, что расстояние между двумя нечеткими числами \tilde{A} и \tilde{B} находится в соответствии с формулой

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{(y_A - y_B)^2 + (x_A - x_B)^2}{2}}. \quad (7)$$

Определяем показатели S_j и R_j [7], характеризующие, соответственно, групповую полезность и индивидуальные потери и которые при рассматриваемой форме представления исходной информации могут быть вычислены следующим образом

$$S_j = \sum_{i=1}^n [d(\tilde{V}_i^+, \tilde{V}_{ij}) / d(\tilde{V}_i^+, \tilde{V}_i^-)], \quad (8)$$

$$R_j = \max_i [d(\tilde{V}_i^+, \tilde{V}_{ij}) / d(\tilde{V}_i^+, \tilde{V}_i^-)]. \quad (9)$$

Вычисляем характеристику $Q_j, j = 1, \dots, m$ на основе выражения

$$Q_j = \begin{cases} \frac{R_j - R^+}{R^- - R^+} & \text{если } S^+ = S^- \\ \frac{S_j - S^+}{S^- - S^+} & \text{если } R^+ = R^- \\ \eta \frac{(S_j - S^+)}{(S^- - S^+)} + (1 - \eta) \frac{(R_j - R^+)}{(R^- - R^+)} & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (10)$$

где $S^+ = \min_j S_j$, $S^- = \max_j S_j$, $R^+ = \min_j R_j$, $R^- = \max_j R_j$, η - показатель, определяющий относительный вес стратегии выбора компромиссного решения согласно идеологии характеристик S или R . При отсутствии конкретных соображений принимается $\eta = 0,5$.

Ранжируем альтернативы, основываясь на вычисленных значениях Q_j , полагая, что лучшей альтернативе соответствует наименьшая величина данного показателя. Полученные результаты

позволяют в дальнейшем проверить (и при необходимости скорректировать) ранжирование альтернатив согласно условиям наличия необходимой стабильности решения и приемлемого различия между альтернативами [7] в соответствии со стандартным алгоритмом метода VIKOR.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, для получения объективных и достоверных результатов при моделировании режимов распределительных сетей и принятия решений с использованием полученных при этом характеристик необходим учет неопределенности исходной информации, связанной с отсутствием необходимой информационной базы, появлением в структуре сетей альтернативных источников энергии с труднопрогнозируемыми выходными характеристиками. Во-вторых, эффективным математическим аппаратом для учета неопределенности количественной информации и возможности использования лингвистических оценок при определении параметров режимов распределительных сетей служит теория нечетких множеств. В третьих, показано, что проведенная в работе модификация метода VIKOR позволяет осуществить ранжирование альтернативных вариантов применения распределенной генерации при нечетком задании показателей, характеризующих влияние интегрируемых в электрические сети генерирующих источников на потери электрической энергии, надежность электроснабжения и качество электрической энергии (в плане допустимости отклонений напряжения), соблюдая при этом правила выполнения арифметических операций над нечеткими множествами и выполняя присущее данному методу требования оценки оптимальности альтернатив на основе вычисляемого расстояния до идеального решения.

Список использованной литературы

1. Праховник А.В. Совершенствование информационного обеспечения задач моделирования и управления режимами СЭС в условиях реформирования электроэнергетики. Требования и общие принципы организации баз данных для решения задач моделирования и оптимизации режимов в современных системах электроснабжения [Текст]/ Праховник А.В., Попов В.А., Ткаченко В.В., Луцько О.С. // Энергетика: економіка, технології, екологія N 1, 2010, стор. 42 – 47.
2. Попов В.А. Совершенствование информационного обеспечения задач моделирования и управления режимами СЭС в условиях реформирования электроэнергетики. Принципы учета неопределенности исходной информации при моделировании нагрузок в распределительных сетях [Текст]/ Попов В.А., Ярмолюк Е.С., Саид Банузاده Сахрагард, Журавлев А.А. // Энергетика: економіка, технології, екологія N 1, 2011, стор. 61 – 65.
3. Попов В.А. Евристичний алгоритм моделювання режимів інтегрованих систем електропостачання у врахуванням невизначеності вихідної інформації, Праці Інституту електродинаміки НАН України Збірник наукових праць [Текст]/ Попов В.А., Ярмолюк О.С. Спеціальний випуск, 2012, стор. 40 – 47.
4. Dubois, D. “Fundamentals of Fuzzy sets” [Text] Dubois, D., and Prade, H., Kluwer Academic Publishers, (2000) Boston.
5. Попов В.А. Особенности анализа надежности воздушных распределительных сетей с источниками распределенной генерации [Текст]/ Попов В.А., Ткаченко В.В., Саид Сахрагард, Журавлев А.А. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий N 3/8 (75), 2015, стор. 26-32.
6. Wei Shih-Hua., Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers, Expert Systems with Applications [Text]/ Wei Shih-Hua, Chen Shyi-Ming, (2009) 362, pp.285– 2299.
7. Opricovic S. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [Text]/ Opricovic S., Tzeng G.H. // European Journal of Operational Research, 156; 2004, p. 445-55.
8. Kauffmann A. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications [Text]/ Kauffmann A., Gupta M.M., New York: Van Nostrand Reinhold, (1991).

V. Popov, Dr. Sc. Sciences, prof., ORCID 0000-0003-3484-4597

R. Romaniuk, Msc.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

TAKING INTO ACCOUNT OF THE INFORMATION UNCERTAINTY IN THE MULTICRITERIA EVALUATION OF ALTERNATIVES OF DISTRIBUTED GENERATION INTEGRATION

In solving problems of planning modes of operation in the existing distribution systems one will inevitably face the necessity of accounting information uncertainty. Moreover, the significance of this factor is enhanced in the case of appearance of distributed generation sources, particularly if they are focused on the use of renewable energy, in the structure of electrical networks. It is obvious that the effectiveness and the impact on the electric networks modes of operation indicators (such as energy losses, voltage profile, reliability) implemented sources of generation are largely dependent on their settings and locations. At the same time, taking into account the different physical nature and dimension of aforementioned characteristics, they can not

be represented by a single integral indicator. Taking this circumstance into account a modification of one of the methods of multi-criteria comparison of alternatives is developed in this article to select the optimal variant of the use of distributed generation performed for conditions when a number of modes of operation characteristics are given as a fuzzy quantitative and qualitative variables in the form of fuzzy sets.

Keywords: distributed generation, uncertainty of information, multicriteria comparison of alternatives.

References

1. Prakhovnik A.V. Improving information support simulation and control SES regimes in terms of electricity reform. The requirements and general principles of database solutions to the problems of modeling and optimization in modern power supply systems [Text] / Prakhovnik A.V., Popov V.A., Tkachenko V.V., Lutsk O.S. // *Energetics: ekonomika, tehnologii, ekologiya* N 1, 2010 Side. 42 - 47.
2. Popov V.A. Improving information support simulation and control SES regimes in terms of electricity reform. Accounting for uncertainty of initial information for modeling loads in distribution systems [Text] / Popov V.A., Yarmolyuk E.S., Said Banuzade Sahragard, Zhuravlev A.A. // *Energetics: ekonomika, tehnologii, ekologiya* N 1, 2011 Side. 61 - 65.
3. Popov V.A. Evristichny algorithm modelyuvannya rezhimiv integrovanih systems elektropostachannya in urahuvannyam neviznachenosti vihidnoi Informacie, Pratsi Institutu elektrodinamiki National Academy of Sciences of Ukraine Zbirnik Naukova Pratzen [Text] / Popov V.A., Yarmolyuk E.S. // *Key infrastructure Spetsialny* 2012, sided. 40 - 47.
4. Dubois, D. "Fundamentals of Fuzzy sets" [Text] Dubois, D., and Prade, H., Kluwer Academic Publishers, (2000) Boston.
5. Popov V.A. Features of the analysis of air distribution networks reliability of sources of distributed generation [Text] / Popov V.A., Tkachenko V.V., Said Sahragard, Zhuravlev A.A. // *Eastern European advanced technology magazine* N 3/8 (75) 2015 Side. 26-32.
6. Wei Shih-Hua., Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers, *Expert Systems with Applications* [Text]/ Wei Shih-Hua, Chen Shyi-Ming, (2009) 362, pp.285– 2299.
7. Opricovic S. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [Text]/ Opricovic S., Tzeng G.H. // *European Journal of Operational Research*, 156; 2004, p. 445-55.
8. Kauffmann A. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications [Text]/ Kauffmann A., Gupta M.M., New York: Van Nostrand Reinhold, (1991).

В.А. Попов, д-р техн. наук, проф., **ORCID** 0000-0003-3484-4597

Р.А. Романюк, магістр,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВРАХУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНІЙ ОЦІНЦІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВАРІАНТІВ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

При вирішенні задач планування режимів в існуючих системах електропостачання неминуче стикаються з необхідністю врахування невизначеності інформації. Більш того, значимість даного чинника посилюється в припущенні появи в структурі електричних мереж джерел розосередженої генерації, особливо – якщо вони орієнтовані на використання відновлюваної енергії. При цьому очевидно, що ефективність і характер впливу на режими електричних мереж зазначених джерел генерації багато в чому залежать від їх параметрів і місць локалізації. У цих умовах практичний інтерес являє порівняльна оцінка різних варіантів впровадження засобів розосередженої генерації з точки зору їх впливу на такі показники режиму електричної мережі як втрати і якість електроенергії, надійність електропостачання. Оскільки вказані показники мають різну фізичну природу, їх неможливо представити єдиною комплексною характеристикою, наприклад, економічного характеру. У зв'язку з цим у статті для вибору оптимального варіанту застосування розосередженої генерації здійснена модифікація одного з методів багатокритеріального порівняння альтернатив для умов, коли ряд режимних характеристик представлені нечіткими кількісними і якісними величинами у вигляді нечітких множин.

Ключові слова: розосереджена генерація, невизначеність інформації, багатокритеріальне порівняння альтернатив.

Надійшла 22.02.2017

Received 22.02.2017

ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ЛОКАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ОЦІНКИ МІРИ БЛИЗЬКОСТІ РОЗМІЩЕННЯ ОБ'ЄКТІВ

У статті розглянуто проблеми ефективного використання енергетичних ресурсів в Україні. Визначені переваги створення інтелектуальних мереж з технологією Smart Grid, застосування відновлюваних джерел енергії в локальних енергетичних системах. Сформовані вимоги до розподільних мереж, найбільш розповсюджених на території нашої країни.

Проаналізовано питання техніко-економічного аналізу ефективності комбінованих технологій в електроенергетиці. Розглянуто питання застосування кластерного аналізу у процесі моделювання локальної електроенергетичної системи. Узагальнено процес моделювання локальної електроенергетичної системи.

Виділено ряд критеріїв оцінки оптимальності локальної електроенергетичної системи, що є базовим елементом в процесі підвищення енергоефективності системи. Показано застосування міри близькості між різними варіантами розподілу скінченної множини об'єктів на підмножини, які перетинаються. Запропоновано алгоритм формування оптимальної структури локальної електроенергетичної системи.

Ключові слова: локальна енергетична система, енергетична ефективність, Smart Grid, Microgrid, кластерний аналіз, коефіцієнт стійкості розбиття, міра близькості об'єктів.

Зростання тарифів на електричну і теплову енергію внаслідок вичерпання потенціалу зростання централізованих енергосистем і відсутності конкуренції на роздрібному ринку, нездатність високоінерційних централізованих систем задовольнити різноманітності попиту на енергію призвело до наростаючого відходження споживачів від централізованого енергопостачання до власної генерації і розвитку розосередженої енергетики. Одночасно з цим триває процес формування локальних електроенергетичних систем, які успішно конкурують з централізованою енергетикою за рахунок наближення виробництва електроенергії і тепла до споживачів, що значно скорочує витрати на транспортування енергії, а отже й скорочує її вартість [1, 2, 3].

Динамічні зміни в сценарії світового розвитку, що сталися протягом останніх років, змусили багато країн переглянути підходи до реалізації енергетичної політики та забезпечення національної енергетичної безпеки, на власному досвіді з'ясувати нові грані її розуміння в глобалізованому просторі, звернути увагу на нові ризики функціонування локальних енергетичних систем. Більшість електричних мереж в Україні знаходяться у експлуатації тривалий час, що збільшує рівень втрат електричної енергії та знижує їх пропускну здатність, також значна частина розподільних мереж напругою 6 – 35 кВ (через їх розгалуженість) не оснащена належними засобами протипожевого захисту та автоматики, що збільшує рівень пошкоджуваності цих елементів [4].

На сьогодні у всіх розвинених країнах світу приділяється велика увага системам електроенергетики, що використовують найсучасніше обладнання та технології, засоби вимірювання і управління, які дозволяють на більш високому рівні забезпечити надійність і економічність функціонування електроенергетичних систем [1, 3]. Одним з варіантів вирішення окресленої проблеми є створення локальних мереж, які використовують енергію розподілених джерел енергії. Під інтелектуальними енергосистемами Smart Grid розуміється така система виробництва, передачі і розподілу енергії, яка поєднує в собі елементи традиційної енергетики і новітні енергетичні технології, комплексні інструменти контролю і моніторингу, а також інформаційні технології та засоби комунікації, що забезпечують більш високу продуктивність енергомережі [4, 5]. Створення інтелектуальних мереж дозволяє підвищити надійність енергопостачання і стабільність енергосистеми в цілому.

Електроенергетичні системи під назвою Microgrid є однією з ключових концепцій, спрямованих на розвиток і модернізацію енергетики в усьому світі. Microgrid – концепція локальних енергетичних систем, які можуть працювати як спільно з централізованою енергосистемою району, так і автономно. Генерація будується на традиційному паливі і на використанні поновлюваних джерел енергії. Ключовими елементами таких мереж є децентралізація контролю над мережею завдяки локальним мережевим вузлам, сучасним системам контролю, моніторингу та розподілу електроенергії, а також включенням в мережу відновлюваних джерел електроенергії. Ідея створення Microgrid ґрунтується на створенні локальних (приклад рис. 1).

мережових енергоструктур в окремих регіонах.

Зазначені процеси актуальні також для України, проте не завжди законодавча та технічна база дозволяє провести певні зміни, що викликані наведеними факторами. Концепцію зміни розподільних мереж, найбільш розповсюджених на території нашої країни, можна сформулювати у вигляді наступних вимог [2, 3, 4, 6]:

- доступність: забезпечення споживачів електроенергією без обмежень в залежності від того, коли і де вона їм необхідна, і в залежності від її якості, оплачуваної споживачем;
- надійність: можливість протистояння фізичним і інформаційним негативним впливам без тотальних відключень або високих витрат на відновлювальні роботи, максимально швидке відновлення (самовідновлення) працездатності;
- економічність: оптимізація тарифів на електричну енергію для споживачів і зниження загальносистемних витрат;
- ефективність: максимізація ефективності використання всіх видів ресурсів, технологій і устаткування при виробництві, передачі, розподілі та споживанні електроенергії;
- органічність взаємодії з навколишнім середовищем: максимально можливе зниження негативних екологічних впливів;
- безпека: недопущення ситуацій в електроенергетиці небезпечних для людей і навколишнього середовища.

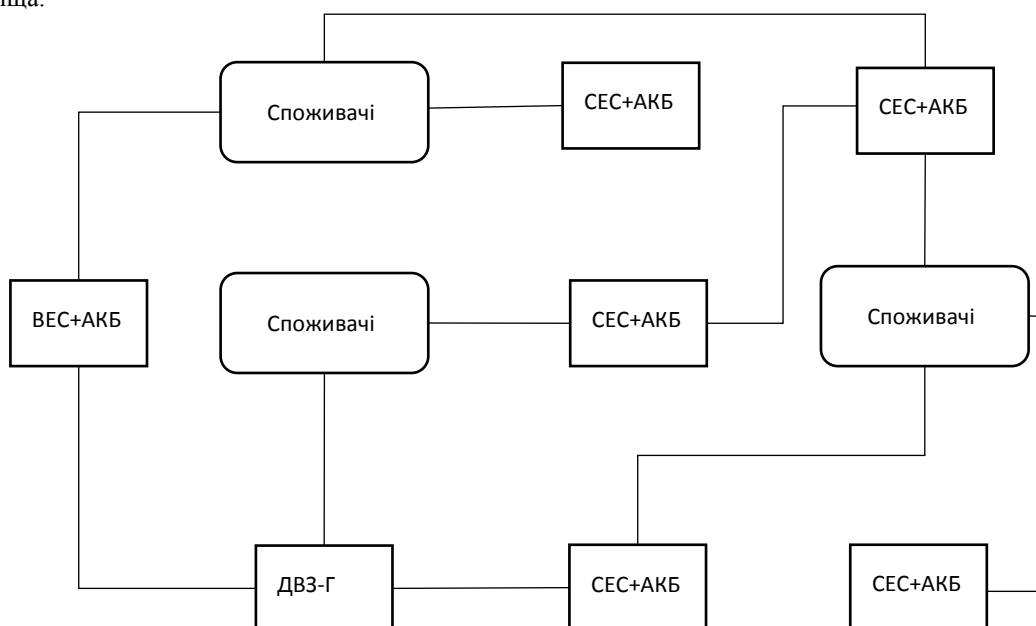


Рисунок 1 – Структура локальної мікромережі:

ДВЗ-Г – двигун внутрішнього згоряння - генератор; АКБ – акумуляторна батарея; ВЕС – вітряна ЕС; СЕС – сонячна ЕС; МГЕС – мала гідроелектростанція (мікрогідроелектростанція); БГЕС – біогазова електростанція; СК – система керування

Системи Microgrid, які з'єднані з централізованими електричними мережами, несуттєво впливають на їх роботу, оскільки основна частина виробленої електроенергії споживається на місці її виробництва і виключає втрати, пов'язані з транспортуванням.

Оскільки Microgrid не має численного обслуговуючого персоналу і великих накладних витрат, це дозволяє встановити ціну на електроенергію нижче ринкової [7].

Питанням техніко-економічного аналізу ефективності комбінованих технологій в електроенергетиці, сьогодні приділяється особлива увага. Розробка підходів до моделювання подібних технологій, методів оптимізації та відповідного програмного забезпечення дозволить вибирати ефективні схемні рішення, відповідне обладнання, і, тим самим, створити основи технології Smart Grid для автономних енергокомплексів, які оптимально забезпечать змінні енергетичні навантаження споживача. Алгоритми рішення таких оптимізаційних задач в рамках технології Smart Grid потрібно розглядати як частину алгоритмів, які включаються в систему керування енергокомплексом, що накладає жорсткі умови на їх швидкодію і комп'ютерні ресурси у зв'язку з необхідністю багаторазового і швидкого вирішення локальних задач оптимізації [5].

Базовими елементами в процесі підвищення енергоефективності локальної електроенергетичної системи є розробка відповідної системи критеріїв оцінки та її елементів, методик оцінки ефективності

схем функціонування в режимах оптимального споживання енергоносіїв, проведення їх енерготехнологічного обстеження та оцінки взаємного впливу окремих елементів. Щодо процедури досягнення ефективності енергоресурсів, то вони визначаються багатьма факторами, що обумовлюють існування та застосування відносно великої кількості показників. Визначення та урахування цих факторів, а також у першу чергу їх пріоритетності, обумовило необхідність застосування трьох систем показників: енергетичних, економічних, екологічних, що вважається достатнім для всебічної оцінки ефективності нововведень [8, 9].

Проблема групування об'єктів за декількома кількісними показниками успішно вирішується за допомогою багатомірних методів аналізу, зокрема кластерного аналізу. Кластер – це група, клас однорідних одиниць сукупності. Основне завдання кластерного аналізу – формування таких груп у багатовимірному просторі [10, 11].

Цілі кластеризації можуть бути різними в залежності від особливостей конкретної прикладної задачі [12]:

- визначення структури безлічі даних, розбивши його на групи схожих об'єктів, для спрощення подальшої обробки даних в кожному кластері окремо;
- скорочення обсягу збережених даних, залишивши по одному найбільш типовому представникові від кожного кластера;
- виділення нетипових об'єктів, які не підходять до жодного з кластерів.

Основна суть алгоритмів кластеризації полягає в наступному. Є навчальна послідовність (набір даних) $\{x_1, \dots, x_n\} \in X$ і функція відстані між об'єктами $\rho(x, x')$. Потрібно розбити послідовність на підмножини, які не пересікаються (звані кластерами) так, щоб кожен кластер складався з об'єктів, близьких за метрикою ρ , а об'єкти різних кластерів істотно відрізнялися. Алгоритм кластеризації – це функція $a: X \rightarrow Y$, яка будь-якому об'єкту $x \in X$ ставить у відповідність мітку кластера $y_i \in Y$. Кількість міток Y заздалегідь невідомо.

Кількість методів розбиття груп об'єктів на кластери досить велике – кілька десятків алгоритмів і ще більше їх модифікацій. У кластеризації виділяють два основних підходи: декомпозиція (неієрархічні), коли кожен об'єкт пов'язаний тільки з однією групою, і кластеризація на основі ієрархій (ієрархічний), коли кожна група більшого розміру складається з груп меншого розміру.

Вирішення задачі кластеризації неоднозначно, оскільки не існує найкращого критерію якості кластеризації, число кластерів, як правило, невідомо заздалегідь і встановлюється відповідно до деякого суб'єктивного критерію, а також результат кластеризації в багатьох алгоритмах істотно залежить від метрики, вибір якої найчастіше суб'єктивний і визначається експертом [11, 12].

Оцінку та систематизацію споживачів електричної енергії здійснюють по наступним експлуатаційно-технічним ознакам: виробниче призначення та зв'язки; режими роботи; рівень потужності; напруга та роду струму; територіальне розміщення; вимоги до надійності електропостачання; стабільність розміщення електроприймачів [13]. Надійність електропостачання визначається числом незалежних джерел живлення та схемою електропостачання.

Узагальнено процес моделювання локальної електроенергетичної системи може бути представлений наступною процедурою. Спочатку на основі первинної моделі M_C системи проводиться агрегування (укрупнення та уніфікація) елементів та параметрів системи (визначення множини елементів, їх зв'язків та параметрів, які необхідно враховувати при моделюванні). Це дозволяє сформувати агреговану модель M_{AGR} . Далі на основі агрегованої моделі M_{AGR} проводиться діакоптика (еквівалентної схеми чи системи рівнянь) на складові, а потім – редукція отриманих моделей з побудовою їхнього ряду редуційованих моделей на основі виділення значимих і незначимих елементів моделі. Виділення значимих та незначимих елементів, параметрів та режимів вимагає використання граничних коефіцієнтів [14, 15].

Введемо позначення: AGR – операція агрегування елементів та параметрів моделі M_C ; D – операція діакоптики моделі M_{AGR} на складові M_1, \dots, M_d ; R – операція редукції моделі M_j з отриманням моделі M_Σ ; S – операція синтезу нової моделі, на основі результатів моделювання моделі M_Σ з отриманням моделі M_Σ (виконання модифікації моделі M_Σ). Операція синтезу S реалізується у випадку необхідності здійснення модернізації (вдосконалення) локальної електроенергетичної системи. Структурну схему моделювання тоді можна записати у вигляді

$$AGR(M_C) \rightarrow D(M_{AGR}) \rightarrow R(M_j)_{j=1,d} \rightarrow M_\Sigma \rightarrow S(M_\Sigma) \rightarrow M_\Sigma, \quad (1)$$

де M_j – виділені в результаті діакоптики моделі еквівалентної підсхеми; $D(M) = \{M_1 \dots M_d\}$; $R(M_j)_{j=1,d} = \{M_{j1}, \dots, M_{jlj}\}$; $M_\Sigma = \{M_{1,1}, \dots, M_{1,l1}, M_{2,1}, \dots, M_{d,ld}\}$; $d, lj (j = 1, d)$ – рівні діакоптики та редукції [16].

Для оцінки досягнення мети використовується цілий ряд показників – критеріїв, так як енергетична система системи носить багатовимірний характер. Кожен з критеріїв повинен бути кількісно вимірний, визначений на одній з шкал вимірювань.

При прийнятті управлінських рішень можуть бути використані всі відомі види шкал: номінальна, рангова, інтервальна і абсолютна. Важливим завданням є побудова системи показників, що відображають генеральну мету особи, яка приймає рішення. У літературі сформульовано цілий ряд вимог, яких необхідно дотримуватися, щоб використання системи показників було виправданим. Це вимоги повноти, дієвості, розложення, ненадлишковості та мінімальної розмірності [17].

Вирішення задачі групового вибору альтернатив – процес складний і багатоетапний. Великий обсяг вихідної інформації, причому часто суперечливої і розрізненої, складність алгоритмів групового вибору, а також необхідність аналізу та коригування отриманої інформації на кожному кроці прийняття колективних рішень вимагають використання сучасних обчислювальних засобів. Рішення всіх цих проблем покладається на інтелектуальну систему підтримки групового вибору [18].

Отримана в процесі підготовки рішення інформація про безліч значень (якісних або кількісних оцінок) критеріїв по оцінюваним альтернативам в передбачуваних можливих ситуаціях їх реалізації зменшує невизначеність завдання і забезпечує умови для вибору оптимального рішення.

Оцінка альтернатив $x \in X$ проводиться на базі можливої інформації про критерії $k \in K$ і передбачуваних станах зовнішнього середовища $e \in E$ при реалізації цих альтернатив вибору варіантів системи (таблиця 1).

Таблиця 1 – Інформація для оцінки альтернатив вибору варіантів системи

Критерій		Стан	
Потужність (кількість елементів у множині) критеріїв K	Шкала вимірювань	Потужність (кількість елементів у множині) станів зовнішнього середовища E	Опис
Один критерій	Якісна (рангова)	Один стан	Визначеність
Багато критеріїв	Кількісна	Багато станів	Ризик, невизначеність

Наявність і відсутність будь-якої інформації дозволяє виділити характерні типи індивідуальних завдань прийняття рішень [19].

В якості критеріїв оптимальності ми будемо використовувати наступні [8, 9]:

1. Енергетичні. Під енергетичною ефективністю будемо розуміти сукупність різних показників, які впливатимуть на обсяги виробленої енергії і відповідно на витрати [20]. Серед цих показників можна виділити такі, як ККД, тривалість роботи за рік, матеріалоємність, територія, яку займає генеруючий енергооб'єкт, надійність, якість енергії.

2. Економічні. До них зазвичай відносять ті, що дозволяють визначити обсяги можливої економії палива і енергії, масштабність реалізації енергозберігаючих заходів, а також характеризувати рівень їх ефективності. Це можуть бути питомі витрати енергетичних ресурсів (палива, тепла та електричної енергії) на виробництво продукції, коефіцієнти корисного використання енергоресурсів, показники втрат енергоресурсів, енергоємність основних виробничих фондів, сировина та матеріали тощо.

Систему економічних показників для визначення економічної ефективності енергозберігаючих заходів складають вартісні показники використання енергоресурсів і супутніх виробничих процесів з метою попередження можливих втрат та покращення результатів діяльності галузі економіки, регіону або підприємства (організації) [21].

Завдяки існуючій у світовій практиці методиці розрахунку ефективності, енергозберігаючі проекти або заходи слід проводити з використанням таких показників, як чистий дисконтований прибуток, термін окупності, індекс прибутковості [21, 22]. Наприклад, у процесі визначення ефективності енергозберігаючого проекту необхідно провести порівняння різночасових економічних показників шляхом їх приведення до якогось одного певного моменту. Результати дослідження дають змогу вважати енергозберігаючий захід або проект економічно ефективним при наявності прибутку, який утворився при впровадженні даного заходу:

$$E_2 = C_{3п} \times Q_{3п} / B_{\Sigma}, \quad (2)$$

де $C_{3п}$ та $Q_{3п}$ – ціна та вартість заміщеного умовно палива; B_{Σ} – сумарні приведені витрати за термін служби генеруючого енергооб'єкта. Величина B_{Σ} визначається як сума наступних доданків:

$$B_{\Sigma} = B_B + B_E + B_{П} + B_{Тр} + B_{Лп} + B_D + B_{E.ЗБ} \quad (3)$$

де $B_B, B_E, B_{П}, B_{Тр}, B_{ЛП}, B_D$ – приведені затрати на будівництво генеруючого енергооб’єкта, його експлуатацію протягом терміну служби, на паливо, транспорт, лінії електропередач і додаткові витрати; $B_{E.ЗБ}$ – приведені сумарні витрати на компенсацію екологічного збитку. Величина $C_{ЗП} \times Q_{ЗП} = E_{П}$ визначає економічну ефективність від заміщення палива. Це досить таки важливий показник, оскільки може порівнювати різні технології і визначення економічного ефекту від використання енергетичного потенціалу [20].

3. Екологічні. Проблема енергозбереження тісно пов’язана з екологічною, оскільки видобуток, переробка та споживання енергоресурсів практично завжди супроводжуються забрудненням навколишнього середовища. При виявленні резервів покращення екологічної ситуації шляхом зниження викидів у процесі спалювання палива можливе виконання умов забезпечення охорони життєдіяльності людини. Це може бути досягнуто при раціональному підборі видів палива за рахунок впровадження досконалих критеріїв вибору енергозберігаючих заходів, використання повномасштабної та часткової підготовки палива до спалювання, впровадження нових технологій, пошуку нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії та використання вторинних ресурсів.

Критерії екологічності можна представити у вигляді:

$$E_1 = E_B \times E_{AB}, \quad (4)$$

де E_B та E_{AB} – екологічна та абсолютно екологічна безпечність.

Екологічна шкода, яка буде заподіяна середовищу, визначається згідно співвідношення:

$$E_B = 1 / E_{AB}, \quad (5)$$

Можна зазначити ще одну умову впровадження енергозберігаючих заходів, яка буде впливати на екологічність – скорочення споживання енергоресурсів, яке має здійснюватися на фоні контрольованої якості. Завдяки цьому викиди шкідливих речовин будуть автоматично скорочуватись.

Таблиця 2 – Критеріальна оцінка альтернатив вибору варіантів системи

Критерій	Стан	
Потужність об’єктів локальної електроенергетичної системи	M1	Велика
	M2	Середня
	M3	Низька
Енергетична ефективність об’єктів локальної електроенергетичної системи	En1	Висока
	En2	Середня
	En3	Нижче середньої
	En4	Низька
Екологічна ефективність об’єктів локальної електроенергетичної системи	Ek1	Висока
	Ek2	Вище середньої
	Ek3	Середня
	Ek4	Низька

При оптимізації параметрів і режимів енергосистеми необхідно задіяти механізм ранжирування варіантів оптимального розміщення об’єктів. Для цього пропонується використовувати концепцію відстані при ранжируванні безлічі об’єктів, що забезпечують найбільше погодження варіантів з індивідуальними впорядкуваннями експертів. Одна з основних конструкцій зазначеного підходу – побудова «усередненої» ознаки, фактору, що представляє сукупність заданих ознак, як «найбільш близького» до цієї сукупності в геометричному просторі як кількісних, так і якісних ознак [23].

У даний час розподіл множини об’єктів, кожен з яких характеризується сукупністю кількісних ознак, на підмножини, що не перетинаються, виконують двома принципово різними способами.

Перший спосіб – це формальна класифікація (розподіл об’єктів методами кластерного аналізу). Другий спосіб – це класифікація, що виконується експертними методами. У цьому випадку розв’язання задачі має суб’єктивний характер. Експерти, здійснюючи класифікацію, неминуче виходять за рамки формальних обмежень, доповнюючи систему ознак інтуїтивними уявленнями про особливості системи, яку вони вивчають [24].

Будемо обирати ознаки для групування об’єктів по мірі їх впливу на результати класифікації. Оцінювати цю міру будемо за величиною коефіцієнта стійкості розбиття [25, 26].

Нехай на множині альтернатив $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ задані індивідуальні переваги експертів у вигляді матриць попарних порівнянь альтернатив R_1, R_2, \dots, R_m . Потрібно знайти одне або декілька найбільш бажаних альтернативних варіантів рішень або ранжувати варіанти по перевагам.

Зазвичай інформація, яку має кожен з експертів, буває неповною і розрізною. Для побудови колективної структури переваг необхідно представити отриману від експертів інформацію в

структурованому і формалізованому вигляді. У разі отримання суперечливої, неузгодженої інформації використовувати алгоритми, що дозволяють усувати протиріччя [18].

Основною при обробці ознак служить кількісна міра близькості розбивок даної множини L . Оцінкою розбіжності цього розбиття, згідно роботи [27] буде коефіцієнт стійкості розбиття:

$$L(R_i, R_j) = \frac{d(R_i, R_j)}{\frac{1}{2}(\sum_{i=1}^{I_1} |R_i|^2 + \sum_{j=1}^{I_2} |R_j|^2)}, \quad (6)$$

де I_1 – кількість підмножин вихідної множини L при способі розбиття R_i ; I_2 – кількість підмножин вихідної множини L при способі розбиття R_j ; $|R_i|, |R_j|$ – потужності відповідних підмножин.

У свою чергу, для оцінки близькості між двома різними розбиттями R_i та R_j кінцевої множини об'єктів L в [28] отримано вираз:

$$d(R_i, R_j) = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^{I_1} |R_i|^2 + \sum_{j=1}^{I_2} |R_j|^2 \right) - \sum_{i=1}^{I_1} \sum_{j=1}^{I_2} |R_i \cap R_j|^2. \quad (7)$$

Якщо розбиття R_i та R_j повністю співпадають, то має місце співвідношення:

$$\sum_{i=1}^{I_1} |R_i|^2 + \sum_{j=1}^{I_2} |R_j|^2 = \sum_{i=1}^{I_1} \sum_{j=1}^{I_2} |R_i \cap R_j|^2, \quad (8)$$

якщо розбиття R_i та R_j не мають жодного спільного елемента, тоді $R_i \cap R_j = 0$, а отже

$$\sum_{i=1}^{I_1} \sum_{j=1}^{I_2} |R_i \cap R_j|^2 = 0. \quad (9)$$

Величина $d(R_i, R_j)$ буде рівна нулю при повністю співпадаючих способах розбиття та одиниці при повністю неспівпадаючих.

Таблиця 3 – Критерії для групування об'єктів

Кількість елементів у множині	Потужність об'єкту			Енергетична ефективність об'єкту			Екологічна ефективність об'єкту		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	M1	M1	M1	Ен4	Ен3	Ен4	Ек4	Ек3	Ек3
2	M1	M1	M1	Ен4	Ен3	Ен2	Ек4	Ек2	Ек1
3	M1	M1	M1	Ен2	Ен2	Ен2	Ек3	Ек2	Ек1
4	M1	M2	M2	Ен1	Ен4	Ен3	Ек1	Ек4	Ек3
5	M2	M2	M2	Ен2	Ен2	Ен2	Ек3	Ек2	Ек1
6	M2	M3	M2	Ен2	Ен2	Ен2	Ек3	Ек3	Ек2
7	M2	M3	M3	Ен3	Ен3	Ен1	Ек2	Ек4	Ек3
8	M2	M3	M3	Ен3	Ен2	Ен1	Ек1	Ек2	Ек3
9	M2	M3	M2	Ен1	Ен4	Ен3	Ек1	Ек3	Ек4
10	M3	M1	M2	Ен1	Ен1	Ен1	Ек2	Ек1	Ек1
11	M3	M1	M1	Ен1	Ен2	Ен3	Ек1	Ек1	Ек3
12	M3	M2	M1	Ен2	Ен2	Ен2	Ек2	Ек2	Ек4
13	M3	M2	M1	Ен3	Ен2	Ен2	Ек3	Ек2	Ек4
14	M3	M2	M3	Ен2	Ен1	Ен4	Ек3	Ек1	Ек3
15	M3	M2	M3	Ен3	Ен2	Ен3	Ек4	Ек2	Ек2

Для реалізації наведеного механізму запропоновано наступний алгоритм формування оптимальної структури локальної електроенергетичної системи [18, 19, 23, 27, 28]:

- 1) кожному об'єкту $l_1, l_2, \dots, l_n \in L$ присвоюється значення ознак R_1, R_2, \dots, R_m ;
- 2) здійснюється класифікація об'єктів на групи, до яких входять об'єкти l_n ;
- 3) вводиться умова, що кожна ознака R_i може приймати n_i значень, тобто кожен об'єкт l_n характеризується упорядкованим набором: $R_1(l_n), R_2(l_n), \dots, R_m(l_n)$;
- 4) виконується упорядкування значення рангової ознаки за ступенем її прояву, а значить, породжуємо упорядковану розбивку множини об'єктів;

5) знаходиться міра $d(R_i, R_j)$ близькості розбивок, що задовольняє умовам 1 – 4, згідно з формулою (7).

6) по мірі близькості розбивок проводиться класифікація об'єктів на групи так, щоб до однієї групи потрапили «близькі», а до іншої «далекі» об'єкти (згідно з формулою (6)).

Розглянемо систему, яка складається з 15 елементів $L = \{1, 2, \dots, 15\}$. Два різних розбиття даної множини R_i та R_j :

$$R_i = \overline{1,2,3,4} \overline{5,6,7,8,9} \overline{10,11,12,13,14,15},$$

$$R_j = \overline{4,9,10,11} \overline{3,5,6,12,14} \overline{7,8,13,15} \overline{1,2}.$$

Для оцінки близькості між даним розбиттям R_i та R_j виконаємо наступні розрахунки:

1. Розрахуємо суми квадратів чисел об'єктів, які належать кожному класу відповідного розбиття:

$$\sum_{i=1}^{I_1} |R_i|^2 = 4^2 + 5^2 + 6^2 = 77,$$

$$\sum_{j=1}^{I_2} |R_j|^2 = 4^2 + 5^2 + 4^2 + 2^2 = 61.$$

2. Потужність множин, які створені перетином множин R_i та R_j :

$$R_i \cap R_j = \{\overline{1,2} \overline{3} \overline{4} \overline{5,6} \overline{7,8} \overline{9} \overline{10,11} \overline{12,14} \overline{13,15}\}.$$

Відповідно сума квадратів дорівнює:

$$\sum_{g=1}^{I_1} \sum_{k=1}^{I_2} |R_i \cap R_j|^2 = 2^2 + 1^2 + 1^2 + 2^2 + 2^2 + 1^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2 = 27.$$

3. Підставимо ці результати в (7), а потім в (6) та отримаємо:

$$d(R_i, R_j) = \frac{1}{2}(77 + 61) - 27 = 42, \quad L(R_i, R_j) = \frac{42}{\frac{1}{2}(77+61)} = 0,609.$$

Даний коефіцієнт показує наскільки близькі ці розбиття та чи співпадають групування, сформовані при даних способах розбиття. Аналогічно розрахуємо коефіцієнти для всіх обраних угруповань для кожного з періодів і занесемо їх у таблицю 4.

Таблиця 4 – Матриця взаємної оцінки стійкості розбиття

Показники	Потужність об'єкту	Енергетична ефективність об'єкту	Екологічна ефективність об'єкту
Потужність об'єкту	0	0,609	0,632
Енергетична ефективність об'єкту	–	0	0,417
Екологічна ефективність об'єкту	–	–	0
Потужність об'єкту	0	0,582	0,554
Енергетична ефективність об'єкту	–	0	0,382
Екологічна ефективність об'єкту	–	–	0
Потужність об'єкту	0	0,338	0,591
Енергетична ефективність об'єкту	–	0	0,554
Екологічна ефективність об'єкту	–	–	0

Аналізуючи отримані результати із таблиці 4 можна стверджувати, що найбільша відстань виникає між розбиттями «потужність об'єкту» та «екологічна ефективність об'єкту», її значення лежить в межах 0,554...0,632. Це означає, що групування по критеріям «потужність об'єкту» та «екологічна ефективність об'єкту», сформовані при прийнятих способах розбиття, не значимі для системи і їх можна не враховувати при подальших дослідженнях. Найменша відстань між розбиттям 0,338 «потужність

об'єкту» та «енергетична ефективність об'єкту», це означає, що ці елементи більш значимі в системі і їх необхідно першочергово враховувати при підвищенні локальної електроенергетичної системи.

Одним з найважливіших заходів підвищення енергоефективності локальної електроенергетичної системи при заданих екологічних обмеженнях є оцінка достовірності інформації, використання адекватних методів і алгоритмів аналізу енергетичних процесів, окремих характеристик і показників відносно яких приймаються рішення і здійснюється практична реалізація напрямків підвищення енергоефективності. Важливим при цьому є вибір та використання ефективних алгоритмів експертних оцінок.

Запропонований алгоритм формування оптимальної структури локальної електроенергетичної системи передбачає:

1. Формування системи показників та подальшого їх використання при групуванні об'єктів.
2. Розбиття об'єктів на групи та пошуку відстані між даними групами об'єктів. При формуванні моделі локальної електроенергетичної системи важливим є виділення каналів, їх взаємозаміни та взаємодоповнення, принципів та етапів агрегування, декомпозиції, редукції. Вибір структури із виділенням і ранжуванням значимих (незначимих) параметрів, структур, процесів і режимів. Необхідність агрегування елементів та параметрів.
3. Знаходження міри близькості між об'єктами, що дозволяє зменшити затрати, сформувані дієві оптимізаційні процедури побудови та розвитку локальних енергетичних мереж. Показник $d(R_i, R_j)$ дозволяє розбити об'єкти на групи так, щоб у одну групу потрапляли «близькі», а в іншу «далекі» об'єкти, що в подальшому дозволить виділити значимі та незначимі елементи та приймати рішення щодо вибору оптимальних структур, параметрів і режимів роботи локальної електроенергетичної системи.

Список використаної літератури:

1. Интеллектуальная энергетическая система ТехноЭкопарк РГСУ. Концепция. В.И. Паршуков. Режим доступа: <http://don-tech.ru/>
2. Стогній Б.С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, А.В. Праховник, С.П. Денисюк // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 52 – 67.
3. Кобец Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Кобец Б.Б., Волкова И.О. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
4. Остапчук О.В. Micro Grid – локальні енергетичні системи / О.В. Остапчук, К.В. Харсун // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2014. – № 153. – С. 32 – 33.
5. Майков И.Л. Решение задач оптимизации энергетических систем с несколькими автономными энергоустановками / Майков И.Л., Директор Л.Б., Зайченко В.М // Управление большими системами. – 2010. – № 31 – С. 110 – 129.
6. Lasseter. R.H. Microgrid: A Conceptual Solution/ R.H. Lasseter, P. Piagi. // PESC'04 Aachen, Germany. – 2004.
7. Микросеть на основе ВИЭ для энергоснабжения сельских территорий. Харченко В.В., Адомавичюс В.Б., Гусаров В.А., Стребков Д.С. Режим доступа: <http://www.ie.asm.md/assets/images/img/pdf/A-95.pdf>
8. Василенко В.І. Системна ефективність функціонування енергетичної системи з керованими навантаженнями / В.І. Василенко // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2015. – № 1. – С.70 – 81.
9. Денисюк С.П. Енергетичні, економічні та екологічні показники енергоефективності / С.П. Денисюк, В.І. Василенко // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – № 1 – С. 33 – 44.
10. Єріна А.М. Статистичне моделювання та прогнозування / А.М. Єріна . – К : КНЕУ, 2001– 170 с.
11. Мандель И.Д. Кластерный анализ / Мандель И.Д. / М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
12. Шалымов Д.С. Алгоритмы устойчивой кластеризации на основе индексных функций и функций устойчивости / Д.С. Шалымов // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2008. – № 4. – С. – 236 – 248.
13. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений / Б.И. Кудрин. – 2-е изд. – М.: Интернет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
14. Денисюк С.П. Оптимизация электропотребления для энергосбережения в системах с преобразователями / Денисюк С.П. // Пробл. энергосбережения. – 1989. – № 2. – С. 49–52.
15. Ковалко М.П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / Ковалко М.П., / Денисюк С.П. / – К.: Українські енциклопедичні знання, 1998. – 512 с.
16. Денисюк С.П. Формування оптимальних структур систем енергопостачання з розподіленими об'єктами / Денисюк С.П., Гуз В.П., Шатан М.О. // Інститут електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – 2005. – С. 25 – 29.

17. Литвак Б.Г. Разработка управленческого решения: Учебник / Б.Г. Литвак. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Дело, 2004. – 415 с
18. Смерчинская С.О. Интеллектуальная система поддержки группового выбора / С.О. Смерчинская. // Труды Международной научно-методической конференции «Информатизация инженерного образования» - ИНФОРИНО-2012 (Москва, 10 – 11 апреля 2012 г.). – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 552 с.
19. Турунтаев Л.П. Разработка управленческих решений: Учебное методическое пособие / Турунтаев Л.П.// Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2004. – 74 с.
20. Беляев Ю.М. Критерии эколого-экономической эффективности энергетических технологий / Беляев Ю.М. // Промышленная энергетика. – 2003. – № 8. – С.39 – 44.
21. Микитенко В.В. Оцінка ефективності енерго- і ресурсозберігаючих технологій / Микитенко В.В. // Проблеми науки. – 2001. – № 12. – С.35 – 41.
22. Микитенко В.В. Інноваційна модель аналізу та прогнозу ефективності галузей і технологій / Микитенко В.В. // Проблеми науки. – 2002. – №4. – С.37 – 41.
23. Гуз В.П. Оптимальне розміщення енергетичних об'єктів при формуванні розподілених систем енергопостачання регіону / Шатан М. О., Гуз В.П. // Энергосбережение. – 2007. – № 9. – С. 27 – 30.
24. Варшавьяк Г.Б. Оценка близости многомерной классификации, выполненной экспертными методами / Г.Б. Варшавьяк, А.И. Ходырев // Системы обработки информации. – 2008. – № 5 – С. 148 – 150.
25. Величко Ю.О. Оценка устойчивости результатов кластерного анализа финансового состояния банков / Ю.О. Величко, В.Ю. Дубницкий, О.Н. Сидоренко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2007. – № 2 – С. 157 – 159.
26. Гадецька С.В. Метрична оцінка тотожності результатів економіко-географічного районування територій / С.В. Гадецька, В.Ю. Дубницький, О.І. Ходирев. // Вісник Університету банківської справи Національного банку України. – 2009. – № 4. – С. 184 – 190.
27. Дубницкий В.Ю. Оценка устойчивости алгоритмов кластерного анализа / Дубницкий В.Ю. // Информационные системы. – 1997. – № 1 – С. 129 – 134.
28. Миркин Б.Г. Об измерении близости между разбиениями конечного множества объектов / Миркин Б.Г., Черный Л.Б. // Автоматика и телемеханика. – 1970. – № 5. – С. 120-127.

V. Vasilenko, ORCID 0000-0001-8571-2573

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
FORMATION THE OPTIMAL STRUCTURE OF LOCAL POWER SYSTEM BASED ON
VALUATION OF PROXIMITY PLACEMENT OF OBJECTS**

In the article is considered the problem of energy efficiency in Ukraine. The advantages of creating intelligent networking technology Smart Grid, the use of renewable energy in local energy networks are identified.

Formed requirements to distribution networks which are the most common in our country. Analyzed the issue of feasibility analysis of the effectiveness of the combined technologies in the power sector. The question of the use of cluster analysis in the modeling of the local power system are considered. Overview process modeling local power system is presented.

It identifies a number of criteria for assessing the optimality of the local power system, which is a basic element in the process of improving the system efficiency. Was shown the application measures the proximity between different versions of the distribution of a finite set of objects into subsets that intersect. An algorithm for the formation of the optimal structure of the local power system was proposed.

Keywords: local electricity grid, energy efficiency, Smart Grid, Microgrid, cluster analysis, splitting stability factor, a measure of proximity of objects.

References:

1. The Intelligent Energy System TehnoEkoparka RGSU. Concept. V.I. Parshukov. Access Mode: <http://don-tech.ru/>
2. Stogniy B.S. The evolution of smart grids and their prospects in Ukraine / B.S. Stogniy, O.V. Kirilenko A.V. Prakhovnik, S.P. Denisyuk // Tech. elektrodinamika. – 2012. – № 5. – P. 52 – 67.
3. Kobets B.B. Innovational Electricity Development based on concept of Smart Grid / B.B. Kobets, Y.O Volkova. – М.: Energy at IAC, 2010. – 208 p.
4. Ostapchuk O.V. Micro Grid – local energy systems / O.V. Ostapchuk, K.V. Harsun // Journal of Kharkov National Technical University of Agriculture Petro Vasilenko. – 2014. – № 153. – P. 32 – 33.

5. Mikov I.L. Meeting the challenges of optimization of energy systems with multiple stand-alone power plants / Mike IL, Director of LB, Zaichenko VM // *Bolshoy Management systems*. – 2010. – № 31 – P. 110 – 129.
6. Lasseter. R.H. Microgrid: A Conceptual Solution/ R.H. Lasseter, P. Piagi. // *PESC'04 Aachen, Germany*. – 2004.
7. Micronet based on renewable energy sources for power supply in rural areas. Kharchenko V.V, Adomavichus V.B, Gusarov V.A Strebkov D.S. Access Mode: <http://www.ie.asm.md/assets/images/img/pdf/A-95.pdf>
8. Vasilenko V.I. System efficiency of the power system with controllable loads / V.I. Vasilenko // *Energy: economics, technology, ecology*. – 2015. – № 1. – P. 70 – 81.
9. Denisyuk S.P. Energy, economic and environmental performance of energy / S.P. Denisyuk, V.I. Vasilenko // *Energy: economics, technology, ecology*. – 2016. – № 1 – С 33 – 44.
10. Yerina AM Statistical modeling and forecasting / AM Yerina. – K: Kyiv National Economic University, 2001. – 170 p.
11. Mandel, I.D. Cluster analysis / Mandel I.D. / M.: Finance and Statistics, 1988. – 176 p.
12. Shalymov D.S. Algorithms based on sustainable clustering index functions and function stability / D.S. Shalymov // *Stochastic optimization in computer science*. – 2008. – № 4. – С – 236 – 248.
13. Kudrin B.I. Electricity supply industry: a textbook for university students / B.I. Kudrin. – 2nd ed. – M.: Intermet Engineering, 2006. – 672 p.
14. Denisyuk S.P. Optimization of power consumption for energy saving in the inverter / Denisyuk S.P. // *Problems. energy saving*. – 1989. – № 2. – P. 49 – 52.
15. Kovalko M.P. Energy conservation – a priority direction of state policy of Ukraine /Kovalko M.P., S.P. Denisyuk / – K.: Ukrainian encyclopedic knowledge, 1998. – 512 p.
16. Denisyuk S.P. Formation of optimal structures of power supply systems with distributed objects / Denisyuk S.P., Goose V.P., Shatan M.O. // *Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine. Collected Works. Special Issue*. – 2005. – P. 25 – 29.
17. Litvak B.G. Developing management solutions: Textbook / B.G. Litvak. – 5th ed. and ext. – M.: Delo, 2004. – 415 p.
18. Smerchinskaya S.O. Intelligence System Support group selection. / S.O. Smerchinskaya. // *Proceedings of the International Scientific Conference "Informatization of Engineering Education" – INFORINO 2012 (Moscow, 10 – 11 April 2012)*. – M.: MEI Publishing House, 2012. – 552 p.
19. Turuntaev L.P. Development of managerial decisions: Training handbook / Turuntaev L.P. // *Tomsk intercollegiate center of Distance Education*, 2004. – 74 p.
20. Yuri Belyaev Criteria for environmental and economic efficiency of energy technologies / Yuri Belyaev // *Industrial power*. - 2003. – № 8. – P.39 – 44.
21. Mikitenko V.V. Evaluating the effectiveness of energy saving technologies / Mikitenko V.V. // *Problems science*. – 2001. – № 12. – P.35 – 41.
22. Mikitenko V.V. Innovative model analysis and prediction efficiency industries and technologies / Mikitenko V.V. // *Problems science*. – 2002. – №4. – P.37 – 41.
23. Goose V.P. Optimal placement of energy facilities in the formation of distributed energy systems of the region / Shatan M.O., V.P. Goose // *Power*. – 2007. – № 9. – P. 27 – 30.
24. Varshavyak G.B. The estimation of proximity multidimensional classification performed by expert methods / G.B. Varshavyak, A.I. Hodyrev // *Sistemi obrobki Informácie*. – 2008. – № 5 – S. 148 – 150.
25. Velichko J.O. Assessment of the stability of the results of cluster analysis of the financial condition of banks / J.O. Velichko, V.Y. Dubnitskiy, O.N. Sidorenko // *Collection Naukova Prace Harkivskogo universitetu Povitryanih forces*. – 2007. – № 2 – P. 157 – 159.
26. Hadetska S.V. Metric evaluation results of the identity of the geographical zoning areas / S.V. Hadetska, V.Y. Dubnytsky, O.I. Khodyrev. // *Bulletin of the University of Banking of National Bank of Ukraine*. – 2009. – № 4. – P. 184 – 190.
27. Dubnitskiy V.Y. Assessment of the stability of algorithms of cluster analysis / Dubnitskiy V.Y. // *Information Systems*. – 1997. – № 1 – P. 129 – 134.
28. Mirkin B.G. On measuring the proximity between the partitions of a finite set of objects / B.G. Mirkin, Black L.B. // *Automation and Remote Control*. – 1970. – № 5. – P. 120 – 127.

**ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЛОКАЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ МЕРЫ БЛИЗОСТИ
РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ**

В статье рассмотрены проблемы эффективного использования энергетических ресурсов в Украине. Определены преимущества создания интеллектуальных сетей с технологией Smart Grid, применение возобновляемых источников энергии в локальных энергетических системах. Сформированы требования к распределительным сетям, которые наиболее распространены на территории нашей страны.

Проанализированы вопросы технико-экономического анализа эффективности комбинированных технологий в электроэнергетике. Рассмотрены вопросы применения кластерного анализа в процессе моделирования локальной электроэнергетической системы. Представлен обобщенный процесс моделирования локальной электроэнергетической системы.

Выделен ряд критериев оценки оптимальности локальной электроэнергетической системы, что является базовым элементом в процессе повышения энергоэффективности системы. Показано применение меры близости между различными вариантами распределения конечного множества объектов на подмножества, которые пересекаются. Предложен алгоритм формирования оптимальной структуры локальной электроэнергетической системы.

Ключевые слова: локальная энергетическая система, энергетическая эффективность, Smart Grid, Microgrid, кластерный анализ, коэффициент устойчивости разбиения, мера близости объектов.

Надійшла 15.02.2017

Received 15.02.2017

УДК 621.311.153: 62 – 52

К.Н. Ткачук, д-р техн. наук, проф.,

В.В. Калінчик, магістр,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**ФОРМУВАННЯ ФАКТОРНОГО ПОЛЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ТА
ШКІДЛИВИХ ЧИННИКІВ ВИРОБНИЧОЇ СИСТЕМИ**

В роботі розглядаються підходи до формування складу впливаючих небезпечних і шкідливих виробничих факторів. В якості об'єкта дослідження аналізуються підприємства з вироблення скла і скляних виробів. Технологія отримання скла складається з двох виробничих циклів – циклу технології отримання скломаси і циклу технології отримання скляних виробів. В такій технології виділені наступні характерні виробничі процеси, які характеризуються наявністю небезпечних для людини факторів – транспортування сировини, випалювання і плавлення, ручні операції в процесі виробництва та відновлювальні роботи і реконструкція. Наведені чинники складають факторне поле небезпечних для людини впливів, яке містить чотири групи факторів - механічні, температурні, електричні та аерозолі. Показано, що окрім небезпечних для людини факторів, які пов'язані безпосередньо з виробничим процесом, необхідно також розглядати вплив мікроклімату виробничих приміщень. Для визначення ключових причин впливу цих факторів на людину запропоновано використання діаграма Ісікави.

Ключові слова: небезпечні та шкідливі фактори, виробничий об'єкт, ризики, діаграма Ісікави.

Вступ. Сучасні методи оцінки рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів включають в арсенал своїх процедур і інструментів наступний їх набір: процедуру ідентифікації ризиків; методологію оцінки ризиків, що спирається на визначення рівнів шкідливого впливу факторів ризику і ступеня їх впливу на організм людини.

Методологія оцінки ризиків спрямована на встановлення залежності «шкідливий вплив - результат», що виражається в кінцевому підсумку в визначенні шкідливого впливу на конкретних працівників певних професійних груп.

Для формування складу впливаючих небезпечних та шкідливих факторів в першу чергу необхідно провести аналіз виробничої системи. В даній роботі в якості об'єкта дослідження аналізуються підприємства з вироблення скла і скляних виробів.

Метою роботи є формування факторного поля небезпечних та шкідливих чинників виробничої системи.

Викладення основного матеріалу. В основі сучасної технології виготовлення скла лежить метод Флоат, оскільки він має деякі переваги: висока продуктивність, утворення зовсім незначних оптичних дефектів скляної продукції, а отже, не виникає необхідності проведення додаткової обробки скла [1,2].

Вихідними матеріалами для виготовлення скла є: білий кварцовий пісок SiO_2 ; сода Na_2CO_3 ; вапняк або крейда CaCO_3 .

Допоміжними матеріалами є: барвники – додають певного кольору (оксиди свинцю, міді, бору); глушники – розподіляються в склі у вигляді дрібних частинок, розсіюють світло і утворюють скло молочно-білого кольору (фосфорнокислі, фтористі солі); знебарвлювачі – усувають фарбування скла від оксидів заліза (оксид нікелю, селен, сполуки марганцю); освітлювачі – видаляють газові включення (бульбашки) із розплаву (триоксид миш'яку, селітра); прискорювачі – прискорюють процес варіння скла (сполуки фтору, бору, хлору).

Технологія отримання скла складається з двох виробничих циклів [2]: цикл технології отримання скломаси; цикл технології отримання скляних виробів.

В такій технології можна виділити наступні характерні виробничі процеси, які характеризуються наявністю небезпечних для людини факторів [3].

1. Транспортування сировини: вплив шуму; вплив на дихальні шляхи аерозолів; вплив ергономічних факторів; виробничі травми.

2. Випалювання і плавлення: вплив продуктів згоряння; вплив димів і аерозолів вихідної сировини; пожежі або вибухи; вплив інфрачервоного випромінювання розплавленого матеріалу; випромінювання енергії і тепловий удар; електротравматизм; вплив шуму.

3 Ручні операції в процесі виробництва, переробки, фасувально-пакувальних робіт і зберігання на складі: ергономічний травматизм.

4. Відновлювальні роботи та реконструкція: ергономічний травматизм; вплив аерозолу оксиду кремнію, азбесту, волокон вогнетривкої кераміки або частинок, що містять домішки важких металів та інші.

Вищенаведені чинники складають факторне поле небезпечних для людини впливів [3], яке містить чотири групи факторів. З метою визначення ключових причин, використана складова комплексного аналізу – діаграма Ісікави [4]. За результатами такого оцінювання визначені групи показників, що мають наступний вигляд (рис. 1).

Механічні – шум, ергономічні фактори виробництва, виробничий травматизм. Найбільш небезпечним в цій групі факторів є виробничий шум, оскільки повністю уникнути його неможливо і він може стати причиною виробничого травматизму. У робітників, які мають справу з гуркотливими машинами та механізмами, виникають стійкі порушення слуху, що нерідко призводить до професійних захворювань (глухуватості і глухоти). Найбільша втрата слуху спостерігається протягом перших десяти років роботи, і з плином часу ця небезпека зростає. Проте тривалий шум впливає не лише на слух. Він робить людину нервовою, погіршує її самопочуття, знижує працездатність та швидкість руху, сповільнює розумовий процес. Усе це може спричинити аварію на виробництві. Шум впливає на систему травлення і кровообігу, серцево-судинну систему. У разі постійного шумового фону до 70 дБ виникає порушення ендокринної та нервової систем, до 90 дБ — порушує слух, до 120 дБ — призводить до фізичного болю, який може бути нестерпним. Шум не лише погіршує самопочуття людини, а й знижує продуктивність праці на 10—15 %. У зв'язку з цим боротьба з ним має не лише санітарно-гігієнічне, а й велике техніко-економічне значення.

Температурні – теплове випромінювання, вплив продуктів згоряння, пожежі та вибухи, теплові удари та опіки. Головним параметром для цієї групи факторів є температура, або її перевищення над температурою, яка є нормальною для діяльності людини, оскільки людина постійно знаходиться в процесі теплової взаємодії з навколишнім середовищем. Для того, щоб фізіологічні

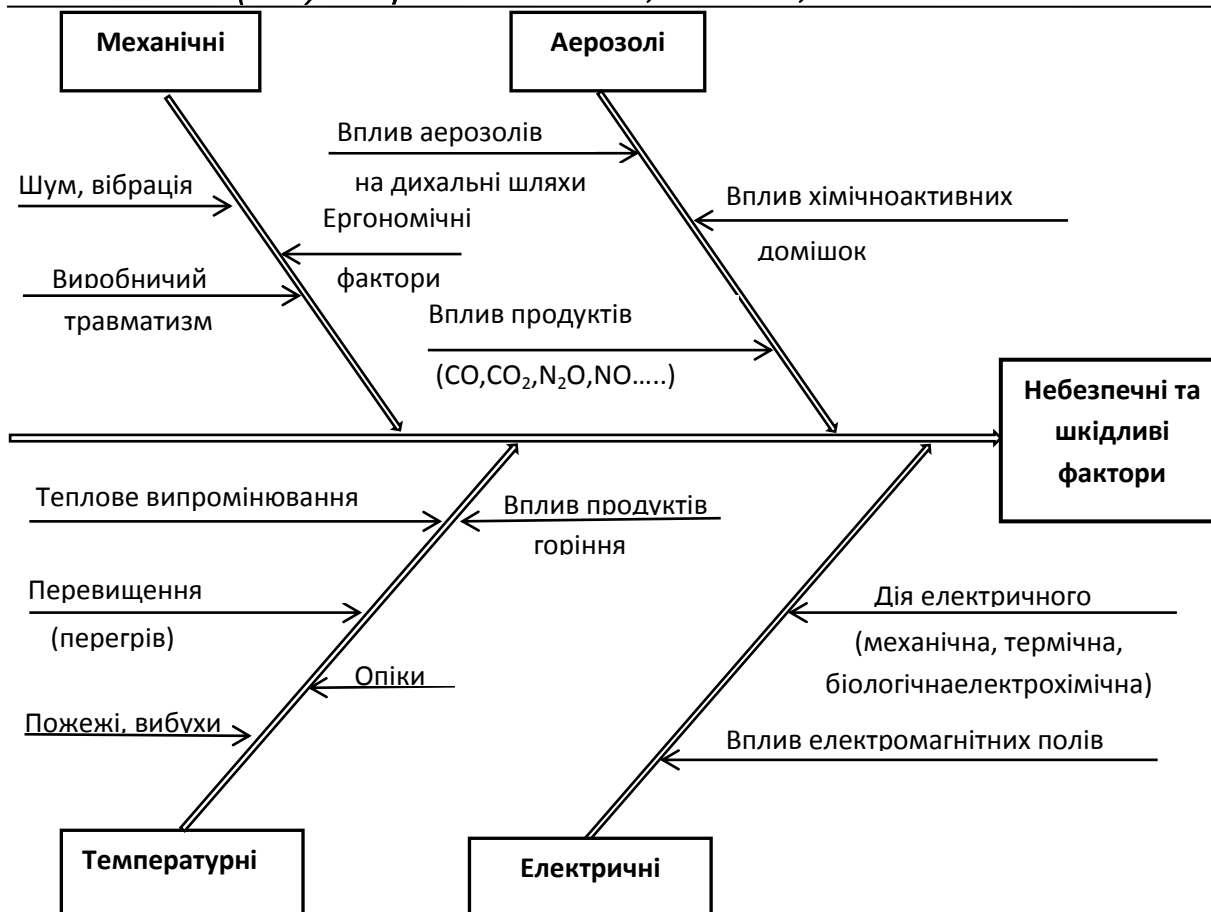


Рисунок 1 – Сукупність впливаючих небезпечних та шкідливих факторів

процеси проходили нормально, тепло, яке виділяє організм, має виводитись в навколишнє середовище. Співвідношення між кількістю цього тепла і здатністю середовища до охолодження характеризує умови як комфортні. В умовах комфорту у людини не виникає турбот щодо температурних відчуттів охолодження чи перегріву. Висока температура впливає на людину і сприяє розширенню кровоносних судин. Відповідно має місце підвищений приплив крові до поверхні тіла і тепловіддача в навколишнє середовище значно підвищується. Однак, коли температура навколишнього середовища і поверхні досягає 30—35 °С, віддача тепла конвекцією і випромінюванням в основному припиняється. Більш висока температура повітря сприяє тому, що більша частина тепла віддається за рахунок випаровування його з поверхні шкіри. В таких умовах організм губить відповідну кількість вологи, а разом з нею і солі, які відіграють важливу роль в життєдіяльності організму.

Під час впливу високої температури повітря, інтенсивного теплового випромінювання є можливість перегріву організму людини, котрий характеризується підвищенням температури тіла, рясним потовиділенням, прискореним пульсом і диханням, різкою слабкістю, запамороченням, а в тяжких випадках — появою судом і виникненням теплового удару.

Вплив продуктів згоряння доцільно розглядати у поєднанні з їх хімічними властивостями в наступній групі факторів.

Вплив аерозолів на дихальні шляхи людини, вплив допоміжних хімічних речовин.

Шкідливий вплив факторів цієї групи визначається окремими маніпуляціями з сировиною, як і при здійсненні технологічних процесів.

При виконанні ремонтно-профілактичних робіт, у разі знесення, реконструкції та будівництві будівель.

Вплив в зонах відсутності вентиляції, в разі протікання і порушення герметичності на ділянках переміщення матеріалу, випускних жолобів, конвеєрів, елеваторів, грохотів і сит, змішувачів, установок для подрібнення і стирання, ємностей для зберігання, клапанів, трубопроводів, печей для сушки і затвердіння і т.п.

Використання абразивних матеріалів, що викликають підвищений знос систем транспортування і зберігання в процесі виробництва. Порушення умов утримання обладнання газоочистки, скрубєрів і

пилосбірників, використання стисненого повітря для виконання операція очищення - збільшує ризик небезпечного впливу.

Шкідливий вплив факторів цієї групи визначається також хімічним складом речовини та її концентрацією. Найбільш розповсюдженими в цій групі є:

Вуглекислий газ CO_2 утворюється в результаті спалювання викопних видів палива, таких як вугілля, нафта, природний газ, штучне та синтетичне паливо і біомаса (деревина). У результаті неповного згорання виділяється також монооксид вуглецю CO - токсичний газ, що шкідливо впливає на серцево-судинну систему людини.

Діоксид сірки, або сірчистий ангідрид SO_2 - один із найтоксичніших газоподібних викидів енергоустановок, становить приблизно 90 % викидів сірчистих сполук із димовими газами котлоагрегатів (решта - SO_3). Найбільшу кількість сірки містять вугілля і важкі види нафтопродуктів; легкі нафтопродукти містять меншу кількість сірки, і, нарешті, бензин і природний газ практично не мають її у своєму складі. Діоксид сірки впливає на окиснювання, руйнує матеріали, шкідливо впливає на здоров'я людини.

Оксиди азоту утворюються під час спалювання будь-якого з викопних видів палива, що містять азотні сполуки. Азот утворює із киснем ряд сполук (N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 і N_2O_5), властивості яких, активність і тривалість існування різні і слабо залежать від виду і складу палива. Концентрація оксидів азоту визначається режимом і організацією процесів горіння палива.

Токсичні продукти згорання становлять найбільшу загрозу для життя людини, особливо при пожежах в будівлях. Адже в сучасних виробничих, побутових та адміністративних приміщеннях знаходиться значна кількість синтетичних матеріалів, що є основними джерелами токсичних продуктів згорання. Так при горінні пінополіуретану та капрону утворюється ціанистий водень (синільна кислота), при горінні вініласту — хлористий водень та оксид вуглецю, при горінні лінолеуму — сірководень та сірчистий газ і т. д. Найчастіше при пожежах відзначається високий вміст в повітрі оксиду вуглецю. Так, в підвалах, шахтах, тунелях, складах його вміст може становити від 0,15 до 1,5%, а в приміщеннях — 0,1—0,6%. Слід зазначити, що оксид вуглецю — це отруйний газ і вдихання повітря, в якому його вміст становить 0,4% — смертельне.

Можна зробити висновок, про взаємний зв'язок температурних та хімічних факторів, оскільки температура є однією з головних умов утворення шкідливих газів.

Електричні – електротравматизм, вплив електромагнітних полів. Дія електричного струму на людину має різносторонній характер.

Фактори, що діють на тяжкість ураження електричним струмом: сила, тривалість дії струму, його вид (постійний, змінний), шляхи проходження, також умови навколишнього середовища.

Електричний струм спричиняє термічну, електролітичну, біологічну та механічну дії.

Термічна дія проявляється у вигляді опіків тіла, нагріванні до високої температури органів, які знаходяться на шляху струму. При цьому виникають суттєві функціональні розлади.

Електролітична дія струму полягає в розшаруванні органічної рідини (крові, плазми), у зміні її фізико-хімічного складу.

Механічна дія струму – це розшарування, розриви тканин організму внаслідок електродинамічного ефекту і миттєвого вибухоподібного утворення пари від перегрітої струмом тканинної рідини та крові.

Біологічна дія струму полягає в подразненні та збудженні живих тканин організму, а також супроводжується порушенням внутрішніх біоелектричних процесів.

Вплив електромагнітних полів (ЕМП) на організм людини залежить від щільності потоку енергії, частоти випромінювання, тривалості впливу, режиму опромінення, розмірів опромінюваної поверхні тіла, індивідуальних особливостей організму. В зоні впливу ЕМП людина зазнає теплового та біологічного впливу.

Висновок. Виробничі процеси характеризуються наявністю небезпечних для людини факторів. Різні небезпечні та шкідливі фактори мають різну тривалість дії, яка залежить від розглянутих виробничих процесів. З метою визначення ключових причин впливу цих факторів на людину, використана складова комплексного аналізу – діаграма Ісікави.

Список використаної літератури.

1. Гулоян Ю.А. Технология стекла и стеклоизделий/ Гулоян Ю.А. – Владимир: Транзит-Икс, 2003. – 480 с.
2. Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла/ Шелби Дж.; [перевод с английского Е. Ф. Медведева]. - М.: Мир, 2006. - 288 с.
3. Чернова А. С. Гигиеническая оценка условий труда и риска нарушения здоровья работающих в современном производстве стеклотары: дис. ... канд. мед. наук: 14.00.17/ Чернова Анна Сергеевна. - Санкт –Петербург, 2007. – 142

4. Ткачук К.Н. Механізми побудови системи моніторингу небезпечних та шкідливих факторів виробничих об'єктів/ Ткачук К.Н., Калінчик В.В.// Энергетика: економіка, технології, екологія – 2014. - № 1. – С. 85 – 89.

К. Tkachuk, Dr. Sc. Sciences, Prof.,

V. Kalinchyk, master,

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

FORMING OF VECTOR FIELD OF HAZARDOUS AND HARMFUL PRODUCTION SYSTEM FACTORS

We consider approaches to form affecting dangerous and harmful factors composition. As an object of research we analyzed companies with production of glass and glass products. It is shown that the basis of modern glass technologies is Float method as such as the one which has a number of advantages - high performance and small optical defects formation in glass products, what eliminate the need for additional processing glass. Technology for glass consists of two production cycles – first glass mass technology and second glass products technology. In such technology we identified the following typical manufacturing processes, characterized by the presence of dangerous factors: transportation of raw materials, which is characterized by the influence of noise effects on respiratory aerosols, ergonomic factors impact, industrial injuries; burning and melting, which is characterized by the influence of combustion products, fumes and aerosols feedstock exposure, fire or explosion hazard, infrared radiation molten material influence, electrical injuries, noise impact; manual operations in the production and restoration works and reconstruction, characterized by ergonomic injuries, the influence of aerosols. These factors constitute a factor field of dangerous influences, which contains four groups of factors - mechanical, thermal, electrical and aerosols. It is shown that in addition to hazards that are directly related to the production process, also we have to consider the effect of microclimate of industrial premises. Ishikawa diagram was suggested to determine the key reasons for the influence of these factors on human.

Keywords: hazardous and harmful factors, manufacturing facility, risks, Ishikawa diagram.

References

1. Huloyan U. A. Technology of glass and glassware / Huloyan U. A. - Vladimir: Transit-X, 2003. -480 p.
2. Shelby J. Glass: Nature, Structure, and Properties / Shelby J. - M.: Mir, 2006. -288 p.
3. Chernova A. S. Hygienic assessment of working conditions and the risk of workers' health violations in modern glassware production: M.D. thesis: 14.00.17/ Chernova A. S. - Saint Petersburg, 2007. -142 p.
4. Tkachuk K.N. Construction monitoring mechanisms of hazardous and harmful factors of manufacturing systems / Tkachuk K.N., Kalinchyk V.V.// Power engineering: economics, technique, ecology - 2014. – № 1. – p. 85 – 89.

УДК 621.311.153: 62 – 52

К.Н. Ткачук, докт. техн. наук, проф.,

В.В. Калінчик, магістр,

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ФОРМИРОВАНИЕ ФАКТОРНОГО ПОЛЯ ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

В работе рассматриваются подходы к формированию состава влияющих опасных и вредных производственных факторов. В качестве объекта исследования анализируются предприятия по изготовлению стекла и стеклянных изделий. Технология получения стекла состоит из двух производственных циклов - цикла технологии получения стекломассы и цикла технологии получения стекла. В такой технологии выделены следующие характерные производственные процессы, которые характеризуются наличием опасных для человека факторов - транспортировка сырья, выжигание и плавления, ручные операции в процессе производства и восстановительные работы и реконструкция. Приведенные факторы составляют факторное поле опасных для человека влияний, которое содержит четыре группы факторов - механические, температурные, электрические и аэрозоли. Показано, что кроме опасных для человека факторов, связанных непосредственно с производственным процессом, необходимо также рассматривать влияние микроклимата производственных помещений. Для определения ключевых причин влияния этих факторов на человека предложено использование диаграммы Исикава.

Ключевые слова: опасные и вредные факторы, производственный объект, риски, диаграмма Исикавы.

Надійшла 21.03.2017

Received 21.03.2017

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 620.9:697.32

М.Ф. Боженко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-00003-2649-0901

І.Я. Перевьорткіна, магістрантка,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УТИЛІЗАТОРІВ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЕЛЕНЬ ЗА РАХУНОК ЗВОЛОЖЕННЯ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ

Наведені методика і результати розрахунків енергетичної та екологічної ефективності поверхневих теплоутилізаторів водогрійних котелень при підвищенні ентальпії димових газів на вході та глибокому охолодженні димових газів. Встановлено, що підвищення ентальпії на вході можливо за рахунок збільшення вологовмісту димових газів, що досягається зволоженням дуттьового повітря. Отримані залежності коефіцієнта байпасування, питомого потоку відведеної в калориферах теплоту та його приріст від кінцевої температури охолодження димових газів у разі зволоження дуттьового повітря при різних початкових температурах в інтервалі 140 - 190 °С. Показано, що максимальний потік відведеної теплоту в калориферних установках відповідає температурам димових газів на виході, які зменшуються від 28 до 23 °С. Мінімальний коефіцієнт байпасування при охолодженні димових газів складає 0,25 – 0,33. Максимальний приріст теплового потоку відповідає температурам охолоджених димових газів 23 – 28 °С і складає біля 10 %. При зволоженні дуттьового повітря, що надходить на газіві пальники котлів, викидання оксидів азоту з димовими газами, зменшується приблизно у 2 рази.

Ключові слова: водогрійний котел, димові газі, теплоутилізатор, дуттьове повітря, зволоження, ентальпія, вологовміст, тепловий потік, температура точки роси, енергетична та екологічна ефективність.

Вступ

Зменшення витрати природного газу в промисловій та комунальній теплоенергетиці за рахунок підвищення коефіцієнта корисної дії, наприклад, опалювальних водогрійних котелень – нагальне завдання сьогодення.

В багатьох діючих опалювальних котельнях систем централізованого та помірно-централізованого теплопостачання працюють водогрійні котли типу КВ-ГМ, температура димових газів на виході з яких при спалюванні природного газу коливається від 140 °С до 190 °С [1]. Зниження цієї температури за рахунок використання теплоутилізаторів, а також підвищення їх ефективності, в цілому сприятиме підвищенню ККД котельні, який для названих вище окремих котлів коливається від 90,5% до 92,5%.

Постановка задачі

При спалюванні природного газу, наприклад, в водогрійних котлах опалювальних котелень систем централізованого та помірно-централізованого теплопостачання рекомендується встановлювати за ними контактні [2] чи поверхневі [3] утилізатори, які можуть бути використані для нагрівання води власних потреб (сирої і хімічно підготовленої) та зовнішніх споживачів (гарячого водопостачання, низькотемпературних систем опалення, і т. ін.) за рахунок охолодження димових газів.

Одним з основних параметрів, що характеризує ефективність утилізатора, є можливий потік відведеної від димових газів теплоту, кВт, визначений за формулою [4]

$$Q_{к.г} = L_{г}^c (h'_{г} - h''_{г}) \quad (1)$$

де $L_{г}^c$ – масова витрата сухих димових газів, кг/с; $h'_{г}$ та $h''_{г}$ – ентальпія димових газів на вході в утилізатор та виході з нього, кДж/кг.

Масова витрата сухих димових газів

$$L_{г}^c = \frac{B_{к}}{3600} G_{г}^c$$

де $B_{к}$ – витрата природного газу на котел, м³/год; $G_{г}^c$ – маса сухих димових газів, кг/м³.

Для визначення ентальпії димових газів використовується залежність

$$h_{г} = c_{с.г} t_{г} + (2500 + 1,97 t_{г}) d'_{г} \quad (2)$$

де $c_{с.г}$ – теплоємність (кДж/кг), $t_{г}$ – температура (°С), $d'_{г}$ – вологовміст (кг/кг с.г), димових газів.

Збільшити потік відведеної в утилізаторі теплоту $Q_{к.г}$ можливо за рахунок підвищення ентальпії димових газів на вході $h'_{г}$ або зменшення ентальпії на виході $h''_{г}$.

В роботі [5] виконані розрахунки енергетичної ефективності поверхневих утилізаторів калориферів, що встановлені в опалювальній котельні за водоگрійними котлами типу КВ-ГМ, при їх експлуатації в «сухому» та «мокрому» режимах (каскадна утилізація). При роботі калориферів в «сухому» режимі температура димових газів на виході з них становила 60 °С. Для так званого «мокрого» режиму роботи калориферів була визначена мінімальна температура димових газів на виході, що становила 19 – 24 °С, а оптимальне значення коефіцієнта байпасування для цих температур – 0,22 – 0,32. За рахунок глибокого охолодження димових газів при використанні каскадної калориферної установки порівняно з експлуатацією її в «сухому режимі» для котельні з трьома водоگрійними котлами КВ-ГМ-10 за опалювальний сезон можливо досягти збільшення кількості утилізованої теплоти біля 22 тис. ГДж/рік.

Метою даної роботи є підвищення ефективності поверхневих утилізаторів – калориферів, що використовуються в водогрійних котельнях систем централізованого та помірно-централізованого теплопостачання при глибокому охолодженні димових газів, за рахунок збільшення ентальпії димових газів на вході в результаті зволоження дуттьового повітря.

Методика і результати розрахунків енергетичної ефективності

Аналіз формули (1) показує, що величина ентальпії димових газів на вході в теплоутилізатор h'_r зв'язана з її температурою t'_r та вологовмістом d'_r на виході з котла.

Оскільки температура t'_r є фіксованою для котла кожного типу, то очевидно, що підвищення ентальпії h'_r можливо за рахунок збільшення вологовмісту d'_r , величина якого, кг/кг с.г, розраховується за формулою

$$d'_r = \frac{\rho_{H_2O} V_{H_2O}}{G_r^c} \quad (3)$$

де ρ_{H_2O} – густина водяної пари в димових газах при нормальних умовах, кг /м³; V_{H_2O} – дійсний об'єм водяної пари в димових газах, м³/ м³; G_r^c – маса сухих димових газів, кг /м³.

Дійсний об'єм водяної пари в димових газах, м³/ м³

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + [1,6 \alpha_{\text{відх}}(d_p - 0,01) + 0,0161(\alpha_{\text{відх}} - 1)]V_{\text{пов}}^0, \quad (4)$$

де $V_{H_2O}^0$ – теоретичний об'єм водяної пари в димових газах, віднесений до 1 м³ палива, м³/ м³; $\alpha_{\text{відх}}$ – коефіцієнт надлишку повітря за котлом; d_p – вологовміст повітря, кг / кг с.п; $V_{\text{пов}}^0$ – теоретичний об'єм повітря для спалювання 1 м³ природного природного газу, м³/ м³. Зазвичай в розрахунки процесів горіння беруть величину $d_p = 10$ г /кг с.п (0,01 кг / кг с.п), тому складова $1,6 \alpha_{\text{відх}}(d_p - 0,01)$ перетворюється в нуль.

Збільшення величини d_p можливе за рахунок зволоження дуттьового повітря, наприклад, в контактних форсуноквих або насадкових камерах.

Наступні розрахунки проведені при фіксовані значенні $d_p = 40$ г /кг с.п (0,04 кг / кг с.п). Така величина, наприклад, була отримана авторами роботи [6] при зволоженні дуттьового повітря в контактному повітрянагрівачу екологічно чистої теплоутилізаційної установки.

Для усередненого складу природного газу $V_{H_2O}^0 = 2,12$ м³/ м³, $V_{\text{пов}}^0 = 9,59$ м³/ м³ [1], беремо $\alpha_{\text{відх}} = 1,15$, тоді згідно з формулою (4) величина $V_{H_2O} = 2,67$ м³/ м³. Беремо $\rho_{H_2O} = 0,804$ кг /м³, за методикою [4] обчислюємо $G_r^c = 13,42$ кг /м³ і за формулою (3) визначаємо вологовміст димових газів $d'_r = 0,16$ кг / кг с.г (160 г / кг с.г).

Для можливості співставлення отриманих результатів ефективності глибокого охолодження димових газів при зволоженні дуттьового повітря з таким же процесом при подачі на пальники котлів сухого повітря розглянуто каскадну утилізацію [5], згідно з якою за кожним з трьох обраних в котельні водогрійних котлів встановлюються калориферні установки, що експлуатуються в «сухому» режимі, а надалі димові гази після них надходять на одну загальну установку з експлуатацією в «мокрому» режимі.

При «сухому» режимі роботи калориферів температура димових газів на виході t'_{r1} повинна перевищувати не менше ніж на 5 °С температуру точки роси, величина якої визначається за формулою [7]

$$t_p = 37,1d'_r \lg [(3,77 + 0,085 \alpha_{\text{відх}})], \quad (5)$$

де вологовміст димових газів d'_r в г / кг с.г.

Для $\alpha_{\text{відх}} = 1,15$ і визначеного за формулою (3) вологовмісту (при зволоженні дуттьового повітря до 40 г /кг с.п) $d'_r = 160$ г / кг с.г, температура точки роси димових газів, що розрахована за формулою (5), $t_p = 60$ °С. Тоді в подальших розрахунках беремо температуру $t'_{r1} = 65$ °С, що на 5 °С більше, ніж при подачі на пальники сухого повітря з вологовмістом 10 г / кг с.п (вологовміст продуктів згорання $d'_r = 130$ г / кг с.г [5]).

Для виключення конденсації водяних парів з димових газів в газовому тракті та димовій трубі передбачено подачу частини димових газів з температурою t'_r по байпасному газоходу.

Коефіцієнт байпасування Θ підбирається таким, щоби температура суміші димових газів t_{r2}^{cm} була не меншою за $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто

$$\Theta = \frac{65 - t_{r2}''}{t_r' - t_{r2}''},$$

де t_{r2}'' - температура димових газів на виході з калориферної установки, яка експлуатується в «мокрому» режимі, $^{\circ}\text{C}$.

Сумарний можливий потік утилізованої теплоти в калориферних установках, що працюють в «сухому» і «мокрому» режимах, кВт, віднесений до масової витрати сухих димових газів $L_r^c = 1\text{ кг/с}$, визначається за формулою

$$Q_{k,r} = (1 - \Theta) (h_r' - h_{r2}''), \quad (6)$$

де h_r' і h_{r2}'' - ентальпія димових газів на вході в калориферні установки, що працюють в «сухому» режимі, і на виході з установки, що працює в «мокрому» режимі, кДж/кг.

З урахуванням постійних величин, що входять до формули (2) для визначення ентальпії – теплоємності сухих димових газів $c_{c,r} = 1\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ і вологовмісту $d_r' = 0,16\text{ кг/кг с.г}$, формула (6) набуває вигляду

$$Q_{k,r} = (1 - \Theta) \{ 1,315t_r' + 400 - [t_{r2}'' + (2500 + 1,97 t_{r2}'')d_{r2}''] \},$$

де d_{r2}'' - вологовміст димових газів після калориферної установки, що працює в «мокрому» режимі, кг/кг с.г.

Вологовміст d_{r2}'' , кг/кг с.г, визначали за формулою, що рекомендована для цієї величини при охолодженні димових газів до повного насичення ($\varphi_{r2}'' = 100\%$) [8]

$$d_r'' = \frac{0,6382 + 4 \alpha_{в\text{дх}}}{1000(0,199 + \alpha_{в\text{дх}})} e^{0,062 t_r''}.$$

За наведеною вище методикою виконані розрахунки залежностей коефіцієнтів байпасування Θ (рис.1) та потоку утилізованої теплоти димових газів $Q_{k,r}$ (рис.2) в калориферних установках при зволоженні дугтьового повітря від кінцевої температури охолоджених димових газів t_{r2}'' при різних температурах димових газів на виході з котлів - вході в калориферні установки t_r' . Коефіцієнт надлишку повітря у відхідних димових газах брали $\alpha_{в\text{дх}} = 1,15$.

При необхідності вибору калориферних установок, що експлуатуються в «сухому» та «мокрому» режимах, їх теплові навантаження $Q_{k,r1}$ та $Q_{k,r2}$ визначаються окремо за формулою виду (6) при прийнятих та визначених відповідних параметрах димових газів на вході в калорифери і виході з них.

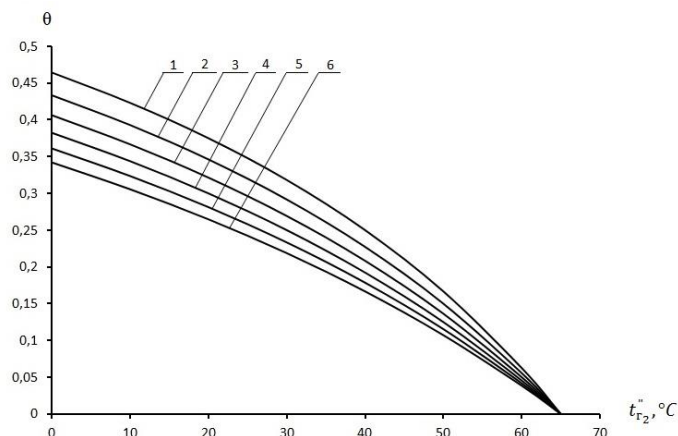


Рисунок 1 – Залежності коефіцієнта байпасування Θ від кінцевої температури охолоджених газів t_{r2}'' при температурах димових газів на вході в калорифери t_r' , $^{\circ}\text{C}$: 1 – 140; 2 – 150; 3 – 160; 4 – 170; 5 – 180; 6 – 190

З отриманих розрахунків видно, що коефіцієнт байпасування для «сухого» режиму роботи калориферів (до температури охолодження димових газів $t_{r2}'' = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$) дорівнює нулю, і при зменшенні цієї температури нижче температури точки роси збільшується. Зі зменшенням початкової температури димових газів після котлів абсолютні значення Θ підвищуються. При зволоженні дугтьового повітря значення коефіцієнтів байпасування збільшуються в усьому діапазоні температур димових газів на вході в калорифери та виході з них.

Загальний потік відведеної в калориферних установках теплоти збільшується зі зменшенням температури охолодження. Значення мінімальних температур димових газів t''_{min} і коефіцієнта байпасування θ_{min} при вихідних температурах димових газів t'_r , які відповідають максимальному потоку відведеної теплоти в калориферних установках, наведені в табл. 1.

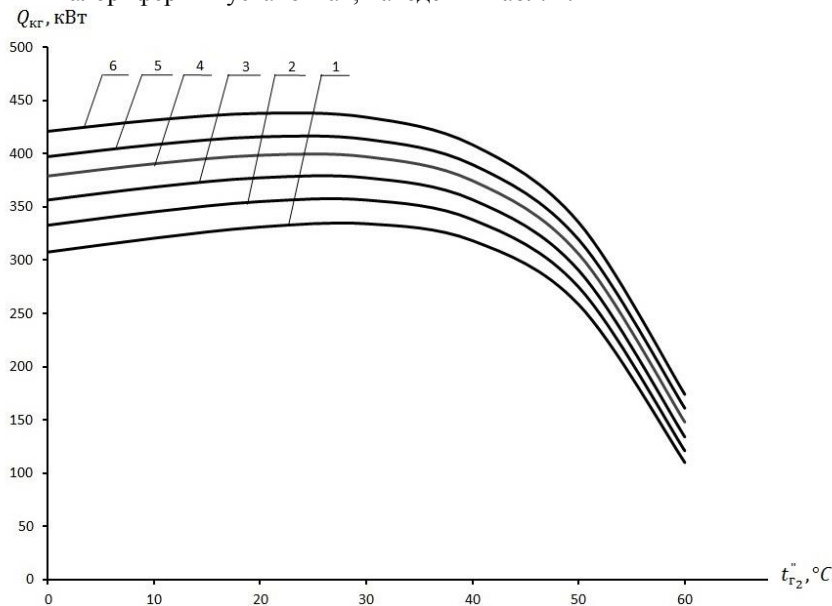


Рисунок 2 – Залежності питомого потоку відведеної теплоти $Q_{к,г}$ від кінцевої температури охолоджених димових газів $t''_{г2}$ при температурах димових газів на вході в калорифери t'_r , °C:
1 - 140; 2 - 150; 3 - 160; 4 - 170; 5 - 180; 6 – 190

Таблиця 1- Оптимальні параметри охолоджених димових газів

t'_r , °C	t''_{min} , °C	θ_{min}
140	28	0,330
150	26	0,315
160	25	0,296
170	24	0,281
180	23	0,267
190	23	0,251

На рис. 3 наведені залежності приросту потоку відведеної в калориферних установках теплоти при зволоженні дуттьового повітря при зміні температур димових газів на вході в калорифери та виході з них. Для порівняння були використані результати розрахунків роботи [5]. З графіка видно, що максимальний приріст теплового потоку відповідає температурам охолоджених димових газів 23 – 28 °C, а в абсолютних величинах цей приріст складає біля 10%.

За методикою [5] визначений загальний максимальний потік відведеної в калориферних установках теплоти при глибокому охолодженні димових газів у разі зволоження дуттьового повітря для водогрійної котельні з трьома водогрійними котлами КВ-ГМ-10 ($t'_r = 185$ °C, $V_k = 1260$ м³/ год; оптимальні значення $t''_{г2} = 23$ °C, $\theta = 0,259$), що дорівнює 5826 кВт. Загальна річна кількість утилізованої теплоти складає 42398 ГДж/рік, а її приріст за рахунок зволоження дуттьового повітря - 4400 ГДж/рік (біля 10%).

Результати розрахунків екологічної ефективності

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 [3].

Величину зменшення викидів оксидів азоту з димовими газами визначають залежно від кількості надлишкової водяної пари, яка надходить з дуттьовим повітрям, що припадає на 1 кг спалюваного природного газу, кг/кг газу [6].

$$W_x = 16,79 \alpha_T d_n (1 - \theta_{пов}), \quad (7)$$

де α_T – коефіцієнт надлишку повітря в топці котла; $\theta_{пов}$ – коефіцієнт байпасування дуттьового повітря, наприклад, з верхньої зони котельні.

Беремо $\alpha_T = 1,05$; $\theta_{пов} = 0,2$; тоді при прийнятому раніше вологовмісту повітря $d_{п} = 0,04$ кг/кг с.п, згідно з формулою (7) величина $W_x = 0,56$ кг/кг газу.

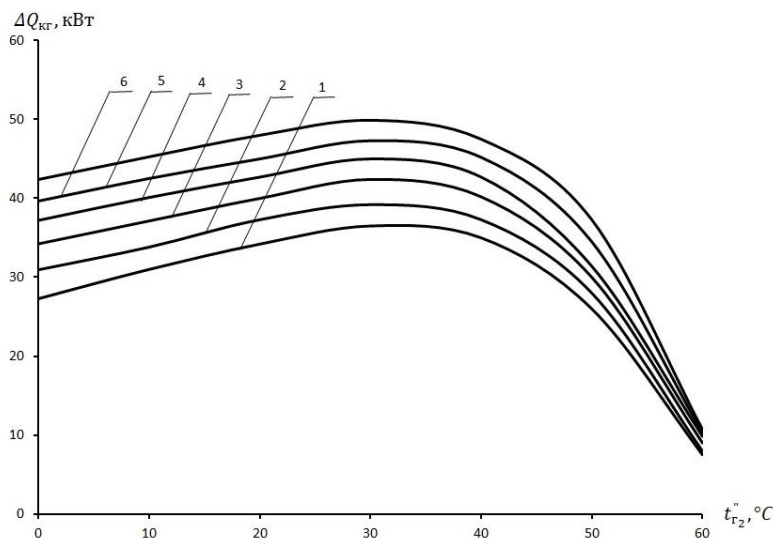


Рисунок 3 – Залежності різниці питомого потоку відведеної теплоти $\Delta Q_{к.г}$ від кінцевої температури охолоджених димових газів $t''_{г2}$ при температурах димових газів на вході в калорифери t'_r , °C:
1 - 140; 2 - 150; 3 - 160; 4 - 170; 5 - 180; 6 – 190

Викидання оксидів азоту в атмосферу (в переліченні на його діоксид), г/с, при спалюванні природного газу у разі зволоження дуттьового повітря обчислюється за формулою [6]

$$M'_{NO_x} = M_{NO_x} e^{-1.11W_x}, \quad (8)$$

де M_{NO_x} - викидання оксидів азоту в атмосферу при спалюванні природного газу без зволоження дуттьового повітря, г/с, визначається за формулою [9]

$$M_{NO_x} = 0,034 B Q_H^p \beta_1 \beta_2 k \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \quad (9)$$

де B – витрата природного газу на котельню, кг/с; Q_H^p – нижча теплота згоряння природного газу, МДж/кг; β_1 - коефіцієнт, яким ураховують кількість спалюваного палива і спосіб шлакозоловидалення (для природного газу $\beta_1 = 0,85$), β_2 - коефіцієнт, яким ураховують конструкцію пальників (для прямооточних пальників- $\beta_2 = 0,85$), k - коефіцієнт, який характеризує вихід оксидів азоту на 1000 кг спаленого умовного палива (кг/т); q_4 – втрати теплоти від механічного недопалу палива, % (для природного газу $q_4 = 0$).

Для водогрійного котла КВ-ГМ-10 витрата природного газу $B_k = 1260$ м³/год, кількість котлів $N_k = 3$ компл., при спалюванні природного газу, що надходить в котельню, наприклад, з газопроводу Гоголево-Полтава, нижча теплота згоряння на суху масу $Q_H^c = 30,98$ МДж/м³, а густина $\rho_r = 0,789$ кг/ м³ [1], тоді $B = 0,828$ кг/с, а $Q_H^p = 39,26$ МДж/кг.

Для водогрійних котлів коефіцієнт

$$k = 2,5 \frac{Q}{(20 + Q_{ном})},$$

де Q і $Q_{ном}$ – фактична і номінальна теплопродуктивність котлів. Гкал/год.

При отриманій в розрахунку теплової схеми котельні $Q = 24,94$ Гкал/год, для трьох обраних котлів $Q_{ном} = 30$ Гкал/год, коефіцієнт $k = 1,247$, тоді згідно з формулами (8) і (9) величини $M_{NO_x} = 1$ г/с і $M'_{NO_x} = 0,525$ г/с.

Таким чином, при спалюванні природного газу у разі зволоження дуттьового повітря викидання оксидів азоту в атмосферу зменшується приблизно у 2 рази порівняно з варіантом без зволоження повітря.

Висновки

1. Розроблені методики розрахунків енергетичної і екологічної ефективності теплоутилізаційної установки з поверхневими калориферами, що використовується для глибокого охолодження димових газів водогрійних котлів в опалювальних котельнях систем централізованого та помірно-централізованого теплопостачання при зволоженні дуттьового повітря.

2. Отримані залежності коефіцієнта байпасування, питомого потоку відведеної в калориферах теплоти та його приріст від кінцевої температури охолодження димових газів у разі зволоження дуттьового повітря при різних початкових температурах в інтервалі 140 - 190 °С.

3. В результаті розрахунків і порівняльного аналізу отримано, що максимальний потік відведеної теплоти в калориферних установках відповідає температурам димових газів на виході, які зменшуються від 28 °С (при $t'_{r1} = 140$ °С) до 23 °С (при $t'_{r1} = 190$ °С). Мінімальний коефіцієнт байпасування при охолодженні димових газів до температур 23 - 28 °С складає 0,25 - 0,33. Максимальний приріст теплового потоку відповідає температурам охолоджених димових газів 23 - 28 °С і складає біля 10 %.

4. Загальний максимальний потік відведеної в калориферних установках теплоти при глибокому охолодженні димових газів у разі зволоження дуттьового повітря для водогрійної котельні з трьома водогрійними котлами КВ-ГМ-10 дорівнює 5826 кВт. Загальна річна кількість утилізованої теплоти складає 42398 ГДж/рік, а її приріст за рахунок зволоження дуттьового повітря 4400 ГДж/рік (біля 10%).

5. Викидання оксидів азоту з димовими газами при зволоженні дуттьового повітря, що надходить на газові пальники котлів, зменшується приблизно у 2 рази.

Список використаної літератури

1. Роддатис К.Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности / К.Ф.Роддатис, А.Н.Полтарецкий; под. ред. К.Ф.Роддатиса. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.
2. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И.З. Аронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
3. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках / А.А.Кудинов. – Ульяновск: УлГПУ, 2000. – 139 с.
4. Боженко М.Ф. Энергосбережения в теплопостачанні: навч. посіб. / М.Ф. Боженко, В.П. Сало. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 268 с.
5. Боженко М.Ф. Каскадна утилізація теплоти димових газів опалювальних водогрійних котельнь / М.Ф.Боженко, І.Я.Перевьорткіна // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2016. - № 1. – С. 81-88.
6. Экологически чистая теплоутилизационная установка с контактными теплообменниками: отчет о НИР (заключит.): 25-11 / Институт проблем энергосбережения НАН Украины; рук. Л.Г.Семенов; исполн.: А.А.Михайлов и др. – Киев, 1994. – 64 с. – Инв.№ 1194.
7. Безлюдный П.П. Определение температуры точки росы продуктов сгорания природного газа / П.П. Безлюдный, Л.Г. Семенов, В.Н.Николаев и др. // *Изв. вузов «Енергетика»*. – 1986. - № 12. – С. 89-90.
8. Семенов Л.Г. Получение конденсата при глубоком охлаждении продуктов сгорания / Л.Г. Семенов // *Промышленная энергетика*. – 1987. – № 8. – С. 47-50.
9. Алабовський О.М. Проектування котельнь промислових підприємств: курсове проектування з елементами САПР: навч. посібник для студентів вузів із спец. «Промислова теплоенергетика» / О.М. Алабовський, М.Ф. Боженко, Ю.В. Хоренженко. – Київ: Вища школа, 1992. – 207 с.

M. Bozhenko, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-00003-2649-0901

I. Perevortkina, Master

ational Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky» IMPROVING EFFICIENCY OF HEAT UTILIZERS OF SMOKE GASES OF BOILER PLANTS AT THE EXPENCE OF WETTING OF BLOWING AIR

Analyzed the types of heat utilizers of flue gases that can be installed on hot water boilers of heating boilers, and consumers of heated water. An examination of the heat balance utilizer equation showed that increasing of the flow of flue gases designated heat or possibly by increasing their enthalpy input, or enthalpy decreasing output. In a previous study was found that deep cooling by using flue gas cascade Heater installation (first use "dry" and "wet" mode) compared to the operation of the "dry" mode for the boiler with three hot water boilers KV-HM- 10 for the heating season is achievable to increase in the number of heat utilized about 22 thousand. GJ / year. The method and the results of calculations of energy and environmental efficiency heat recovery units of surface water boilers at higher flue gas enthalpy input and deep cooling flue gases. It was established that the increase of enthalpy inlet perhaps by increasing the moisture content of the flue gases is achieved blowing moisture in the air in contact sprayer or nozzle cells. The calculations were moist air moisture content of 40 g / kg SP, having moisture content of the flue gas inlet heat 160 g / kg SG, dew point temperature

of 60 ° C and the minimum temperature of the flue gases at the outlet of heaters that work in "dry" mode, 65 ° C. To eliminate the condensation of water vapor from the flue gases in the gas path and stack provides the flow of flue gas from the initial temperature to bypass duct. The resulting dependence of bypassing, assigned to specific flow heaters and heat gain from its final temperature flue gas cooling in case blowing humidifying air at different initial temperatures in the range of 140 - 190 ° C. It is shown that the maximum flow of heat in designated facilities meet Heater Flue gas temperature at the outlet, which decreased from 28 ° C (at = 140 ° C) to 23 ° C (at = 190 ° C). The minimum rate of bypassing on cooling flue gases to temperatures 23 - 28 ° C is 0.25 - 0.33. The maximum increase in heat flow corresponds cooled flue gas temperatures 23 - 28 ° C and is about 10%. The total maximum flow allocated to installations Heater heat during deep cooling of flue gases in the event blowing humidifying air for hot water boiler with three hot water boilers KV-GM-10 is 5826 kW. The total annual amount of heat is utilized 42,398 GJ / year, and its growth through air humidification blowing 4400 GJ / year (about 10%). It is also shown that the moisture blowing air entering the gas burners on boilers, discharge of nitrogen oxides from the flue gases is reduced by about 2 times.

Keywords: hot water boiler, flue gases, heat recovery units, blowing air, humidity, enthalpy, moisture content, heat flow, dew point temperature, energy and environmental efficiency.

References

1. Roddatys K.F. Reference book in boiler plants of the small productivity. / K.F.Roddatys, A.N.Poltaretsky; under. ed .. K.F.Roddatys. - M.: Energoatomizdat, 1989. - 488 p.
2. 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.
3. Kudynov A.A. Energy saving in thermal generating plants / A.A.Kudynov. - Ulyanovsk: UIHPU, 2000. - 139 p.
4. Bozhenko M.F. Energy saving in heat supply: teach. guidances. / M.F. Bozhenko, V.P. Salo. - K: NTU "KPI", 2008. - 268 p.
5. Bozhenko M.F. Cascade utilization of smoke gas heat of heating water boilers / M.F.Bozhenko, I.Ya.Perevertkina // Energy: economics, technology, ecology. - 2016. - № 1. - P. 81-88.
6. Ecological friendly heat utilizing plant with contact heat exchangers: account about NYR (conclude.): 25-11 / Institute of Energy Saving Problems of NAS of Ukraine; supervisor. L.H.Semenyuk; executor. : A.A.Myhaylov etc. - Kiev, 1994. - 64 p. - Ynv.№ 1194.
7. 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.
8. Semenyuk L.G. Getting of condensate cooling of products at deeply combustion / L.G. Semeniuk // Industrial energy. - 1987. - № 8. - P. 47-50.
9. Alabovskyy A.M. Design of industrial boilers, course design with elements of CAD: teach. guide for students with specials. "Industrial power" / A.M. Alabovskyy, M.F. Bozhenko, Yu.V. Horenzhenko. - Kyiv: High School, 1992. - 207 p.

УДК 620.9:697.32

М.Ф. Боженко, доцент, канд. техн. наук; ORCID 0000-00003-2649-0901,

И.Я. Переверткина, магистрантка

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ
КОТЕЛЬНЫХ ЗА СЧЕТ УВЛАЖНЕНИЯ ДУТЬЕВОГО ВОЗДУХА**

Приведены методика и результаты расчетов энергетической и экологической эффективности поверхностных утилизаторов водогрейных котельных при увлажнении дутьевого воздуха и глубоком охлаждении дымовых газов. Определены минимальные температуры охлажденных дымовых газов при работе утилизаторов-калориферов в «сухом» и «мокроем» режимах. Определены оптимальные значения коэффициентов байпасирования горячих дымовых газов в обход утилизаторов при разных их температурах на выходе из котлов.

Ключевые слова: водогрейный котел, дымовые газы, теплоутилизатор, дутьевой воздух, увлажнение, энтальпия, влагосодержание, тепловой поток, температура точки росы, энергетическая и экологическая эффективность.

Надійшла 02.03.2017

Received 02.03.2017

ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО АУДИТУ

У статті розглядаються методичні засади визначення залишкового ресурсу потужних електромеханічних систем при проведенні енергетичного аудиту. Оцінка залишкового ресурсу необхідна для обґрунтування заходів з підвищення енергоефективності електромеханічних систем методом розрахунку вартості життєвого циклу. У статті показано, що строк служби електромеханічної системи значною мірою визначається якістю ізоляції обмоток електродвигуна. Головним чинником, який впливає на термін служби ізоляції, є її робоча температура. Найчастіше застосовується розрахунок нагрівання за експонентою, тобто представлення моделі електродвигуна електромеханічної системи диференціальним рівнянням теплового стану. Найдоцільнішим є підхід, у якому розрахунок поточної температури ізоляції при проведенні комплексного енергоаудиту потужної електромеханічної системи здійснюється за фактичними втратами в електродвигуні з урахуванням режиму навантаження і додаткових втрат, зумовлених несиметрією та несинусоїдальністю напруги. Математичне моделювання та експериментальна перевірка підтвердила адекватність такого підходу до прогнозування залишкового ресурсу електромеханічних систем.

Ключові слова: енергетичний аудит, вартість життєвого циклу, електромеханічна система, залишковий ресурс.

Вступ. Електромеханічні системи (ЕМС), як правило, розраховані на термін служби 20 000 годин без капітального ремонту, за умови правильної їх експлуатації. Під правильною експлуатацією розуміється робота відповідно до номінальних параметрів, зазначених в паспорті устаткування. У реальному житті має місце значне відхилення режимів експлуатації від номінальних.

На даний час надійність електроприводів (ЕП) ЕМС у всіх областях промисловості дуже низька. Щорічно виходять з ладу і ремонтуються до 50% парку електричних машин. Переважна більшість їх після ремонту повертається на підприємство і експлуатується до наступного виходу з ладу. Машина може ремонтуватися 3-4 рази, а час напрацювання на відмову складає 0,5 ... 1,5 року.

Підтримання працездатності ЕМС за рахунок проведення ремонтів не є економічно доцільною. Характеристики відремонтованих ЕМС істотно відрізняються від шойно випущених виробником через те, що в результаті експлуатації та ремонту змінюються характеристики конструкційних матеріалів. Відбувається насичення сталі та зростання струму намагнічування, який стає несинусоїдальним, оскільки містить крім першої також непарні гармоніки 5,7,11... порядків. Зменшення під час ремонту двигуна ЕМС кількості витків на 10% призводить до різкого підвищення густини магнітного потоку у сталі статора, і струм холостого ходу збільшується до 25%, а ККД й коефіцієнт потужності знижуються [1].

Експлуатація ЕМС, яка супроводжується численними ремонтами, призводить до того, що на підприємствах використовується ЕП, реальні енергетичні показники якого значно нижчі декларованих виробником (номінальних) і не відповідають високому рівню енергоефективності.

Для виявлення можливостей підвищення рівня енергоефективності потужних ЕМС при проведенні сучасного комплексного енергетичного аудиту і зниження витрат на експлуатацію слід здійснювати аналізування вартості їх життєвого циклу за складниками витрат (LCC analysis). Детальне дослідження кожного з них дозволяє врахувати їх вплив на подальше зменшення витрат шляхом реалізації відповідних рішень [2].

У розрахунку вартості життєвого циклу LCC складною задачею є визначення залишкового ресурсу устаткування. Це обумовлено великою кількістю факторів, які впливають на ресурс обладнання.

Мета роботи: вдосконалити методичні засади визначення залишкового ресурсу потужних ЕМС при проведенні комплексного енергоаудиту, які дозволяли б оцінювати скорочення строку служби у залежності від режиму навантаження і додаткових втрат, зумовлених несиметрією та несинусоїдальністю напруги. Залишковий ресурс ЕМС, при проведенні енергетичного аудиту, повинен визначатися на основі параметрів, що вимірюються миттєвих значень напруги $u(t)$ та струму $i(t)$.

Аналіз попередніх досліджень. Технічний стан ЕМС визначається насамперед дефектами ізоляції ЕП [3]. Вразливість міжвиткової ізоляції обумовлена входженням її до механічної системи, яка складається з різномірних елементів: міді провідників і полімерних ізоляційних матеріалів. Деформації від зміни температури, електродинамічних зусиль, вібрації обмотки призводять до утворення дефектів.

У переважній більшості випадків (85-95%) відмови ЕП ЕМС потужністю понад 5 кВт пов'язані з пошкодженням ізоляції обмоток і розподіляються наступним чином: міжвіткові замикання - 93%, пробій міжвиткової ізоляції - 2%. Решта відмов у роботі викликані механічними пошкодженнями [4]. Таким чином, термін служби ЕП визначається, в основному, якістю ізоляції його обмоток.

Найчастіше перегрів обмоток ЕП виникає при загальмованому роторі (заклинювання), обриві фази статора, відхиленні напруги мережі від нормованих значень, несиметрії напруги живлення [5].

Одним з методів дослідження теплових процесів ЕП є метод еквівалентних теплових схем заміщення [3, 4]. Теплові процеси в двигуні ЕМС описуються системою диференціальних рівнянь

$$C \frac{d\tau}{dt} + \Lambda \tau = P, \quad (1)$$

де C – вектор-стовпець теплоємностей вузлів двигунів, τ - вектор-стовпець перевищення температури відповідних вузлів над температурою довкілля, Λ - матриця теплопровідностей вузлів, P - вектор втрат потужності у вузлах двигуна.

Спрощено рівняння (1)

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\tau_M}{dt} = \frac{1}{C_M} [\Delta P_M - A_M \Delta\tau_M - A_{MCT} (\Delta\tau_M - \Delta\tau_{CT})] \\ \frac{d\Delta\tau_{CT}}{dt} = \frac{1}{C_{CT}} [\Delta P_{CT} - A_{CT} \Delta\tau_{CT} - A_{MCT} (\Delta\tau_M - \Delta\tau_{CT})] \end{cases} \quad (2)$$

де $\Delta\tau_M, \Delta\tau_{CT}$ - перевищення температури міді й сталі над температурою довкілля; ΔP_M - втрати потужності в міді; C_M, C_{CT} - теплоємності міді й сталі; A_M, A_{CT} - тепловіддача міді й сталі в довкілля; A_{MCT} - теплопередача між міддю і сталлю [6].

Для розрахунків за наведеною системою рівнянь необхідно визначити початкові параметри – теплоємність і коефіцієнти тепловіддачі, що не завжди можливо. Для цього потрібні такі параметри міді, як середня довжина витків, їх кількість, діаметр дроту, а також геометричні розміри сталі.

Найчастіше застосовується розрахунок нагрівання за експонентою, тобто представлення моделі двигуна диференціальним рівнянням теплового стану

$$\frac{d\Delta\tau}{dt} = \frac{1}{C} [\Delta P - A \Delta\tau], \quad (3)$$

де $\Delta\tau$ - перевищення температури двигуна над температурою довкілля у разі синусоїдальної напруги живлення; ΔP – «грінючі» втрати потужності в двигуні, $\Delta P = \Delta P_{\Sigma} - K$; C, A - теплоємність та тепловіддача відповідно, ΔP_{Σ} – повні втрати потужності, K – постійні втрати потужності в двигуні.

У формулі (3) прийнято стандартні припущення: двигун розглядається як однорідне тіло з нескінченно великою теплопровідністю і однаковою температурою в усіх своїх точках; тепловіддача в зовнішнє середовище пропорційна різниці температур двигуна й довкілля; навколишнє середовище має нескінченно велику теплоємність, тобто у процесі нагрівання двигуна температура середовища не змінюється; теплоємність і тепловіддача двигуна не залежать від його температури.

Матеріал і результати досліджень.

Існує кілька підходів до визначення усталеного перевищення температури обмотки статора. Їх недоліком є неврахування параметрів конкретного ЕП, використання специфічних величин (діаметри розточування і зовнішній діаметр сердечника статора), коефіцієнта номінальних втрат в двигуні, тоді як він не завжди працює в номінальному режимі. Найдоцільнішим є підхід, у якому розрахунок поточної температури здійснюється за фактичними втратами в двигуні ЕМС.

У придатній для реалізації в цифровому пристрої різницевій формі рівняння (3) має вигляд [5]

$$\Delta\tau_k = \Delta\tau_{k-1} + \frac{\Delta h}{C} [\Delta P - A \Delta\tau_{k-1}], \quad (4)$$

де $\Delta\tau_k$ - перевищення температури в k -й момент часу; $\Delta\tau_{k-1}$ - перевищення температури в $(k-1)$ -й – момент часу; Δh - крок розрахунку.

Розрахунок тепловіддачі здійснюється для усталеного номінального режиму роботи двигуна ЕМС $A = \Delta P_H / \tau_H$, де τ_H - усталене значення перевищення температури двигуна в номінальному режимі роботи [6].

Згідно [7], сталі нагрівання обмоток статора і ротора відповідно

$$T = \frac{150 \Delta\tau_H}{j_H^2}, T_p = \frac{T}{2},$$

де j_H - густина струму в обмотці статора за номінального навантаження.

У випадку асинхронного двигуна (АД) ЕМС, у формулі (4) $\Delta P = V_1 + V_2 + \Delta P_{1H} k_{3I}^2 + \Delta P_{HCM} + \Delta P_{HC}$, де V_1, V_2 – змінні втрати в статорі та роторі, $\Delta P_{HCM}, \Delta P_{HC}$ – додаткові втрати від неякісної напруги живлення. Таким чином, ураховуються всі втрати, у т. ч. від несиметрії та несинусоїдальності напруги.

Рівняння (4) можна переписати, як

$$\Delta\tau_k = \Delta\tau_{k-1} + \frac{\Delta h}{T_H} \left[\frac{(V_1 + V_2 + \Delta P_{1H} k_{3I}^2 + \Delta P_{HCM} + \Delta P_{HC}) \Delta\tau_{i3}}{\Delta P_H} - \Delta\tau_{k-1} \right]. \quad (5)$$

Модель (5) ураховує лише теплове старіння, а під час роботи АД ізоляція зазнає ще й електричного і механічного впливу. Можна припустити, що насправді її руйнування внаслідок пробою відбудеться значно раніше.

Якщо навантаження відрізняється від номінального, то повні змінні втрати $V = V_H k'_{3I}$, або для Г-подібної схеми заміщення $V = V_1 + V_2 = 3I'^2_2(R_1 + R'_2)$, де R'_2 — приведений активний опір ротора, I'_2 — приведений струм ротора АД, k'_{3I} — коефіцієнт звантаження за приведеним струмом ротора.

Додані (паразитні) втрати визначаються втратами на гістерезис і вихрові струми в режимі холостого ходу та під навантаженням $\Delta P_1 = \Delta P_{1H} k^2_{3I}$, де k_{3I} - коефіцієнт звантаження за струмом двигуна $k_{3I} = I/I_H$.

Додаткові втрати в обмотках і сердечниках двигуна $\Delta P_2 = \Delta P_{НСМ} + \Delta P_{НС}$ обумовлені несиметрією $\Delta P_{НСМ}$ та несинусоїдальністю $\Delta P_{НС}$ напруги живлення.

Додаткові втрати від несиметрії напруги визначаємо як потужність, витрачену на подолання гальмівного моменту двигуна M_2 від струмів зворотної послідовності

$$\Delta P_{НСМ} = M_2 \omega .$$

Гальмівний момент двигуна від струмів зворотної послідовності з урахуванням впливу відхилення напруги і частоти від номінальних значень

$$M_2 = \frac{2M_K \frac{c_{U2}^2}{c_f^2} \left(1 + \frac{R_1 s_K}{R_2 c_f}\right)}{\frac{s_K}{c_f(2-s)} + \frac{c_f(2-s)}{s_K} + 2 \frac{R_1 s_K}{R_2 c_f}},$$

де $c_{U2} = \frac{U_2}{U_H}$ - відносна напруга зворотної послідовності, $c_f = \frac{f}{f_H}$ - коефіцієнти відхилення частоти від номінальних значень, s_K – критичне ковзання, M_K – критичний момент двигуна.

Додаткові втрати від несинусоїдальності напруги

$$\Delta P_{НС} = 2\lambda_{\Pi}^2 V_{IH} \sum_{v=n}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}},$$

де U_v - відношення напруги v -ї гармоніки до номінальної [9].

У [9] наведено вираз для розрахунку температури обмоток τ_{2U} АД ЕМС у функції несиметрії напруги

$$\tau_{2U} = \tau [1 + 2(K_{2U}\%)^2].$$

Згідно [10] додаткове перегрівання обмотки статора внаслідок несинусоїдальності напруги $\Delta\tau_{НС}$ визначається за формулою

$$\Delta\tau_{НС} = 42\Delta\tau \sum_{v=2}^n \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}.$$

Також додаткове перегрівання $\Delta\tau_{НС}$ можна визначити з формули

$$\Delta\tau_{НС} = \tau \frac{\Delta P_{МВ}}{\Delta P_M},$$

де $\Delta P_{МВ}$ - втрати в міді, зумовлені вищими гармоніками напруги [10].

У [9] наведено спрощену формулу визначення перегрівання обмоток внаслідок несинусоїдальності й несиметрії напруги живлення

$$\Delta\tau_{пер} = \frac{280}{b} \left(1,55K_{2U}^2 + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}\right)$$

де $\Delta\tau_{пер} = \tau_{пер} - \tau_H$.

Відносне значення строку служби з урахуванням перегрівання внаслідок несинусоїдальності й несиметрії напруги живлення

$$z = \exp \left[-280 \left(1,55K_{2U}^2 + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}\right) \right].$$

Якщо ЕМС з АД тривалий час працює на пониженої напрузі, то через прискорене зношування ізоляції строк служби його зменшується. Строк служби ізоляції Z можна визначити за формулою $Z = Z_H/R$, де Z_H - строк служби ізоляції двигуна для номінальних напруги і навантаження, R - коефіцієнт, який залежить від величини і знаку відхилення напруги, а також від коефіцієнта звантаження двигуна [11].

$$R = (47\delta U_y^2 - 7,55\delta U_y + 1)k_3^2 \text{ при } -0,2 < \delta U_y < 0; R = k_3^2 \text{ при } 0,2 \geq \delta U_y > 0.$$

Термін придатності ізоляції електродвигуна ЕМС, який працює зі сталим навантаженням

$$Z = ce^{-b\tau},$$

де c і b – сталі коефіцієнти для даного виду ізоляції.

Залишковий ресурс ЕМС

$$Z = Z_{поч} e^{-b\Delta\tau}, \tag{6}$$

де $Z_{\text{поч}}$ - початковий ресурс ізоляції.

Якщо температура τ змінюється у часі t , тобто графік електричного навантаження змінний, строк служби ізоляції

$$Z = c \int_0^t e^{-b\tau} dt.$$

Зношеність ізоляції для роботи ЕМС із постійним навантаженням

$$\xi = \frac{1}{Z} = ce^{b\tau}.$$

Відносна зношеність ізоляції

$$\chi = \frac{\xi}{\xi_H} = e^{b(\tau - \tau_H)} = e^{b\Delta\tau}.$$

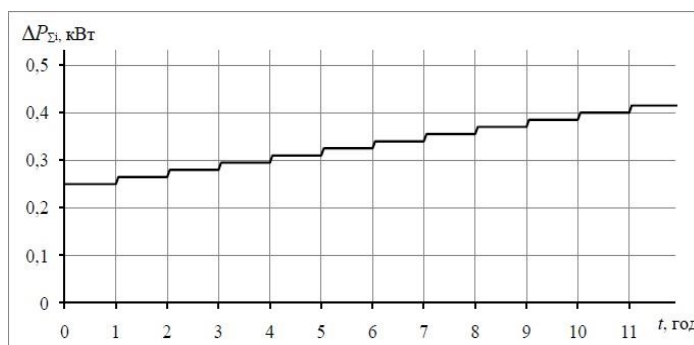
Середнє значення відносної зношеності ізоляції ЕП за період часу T

$$\bar{\chi} = \frac{1}{T} \int_0^T e^{b\Delta\tau} dt.$$

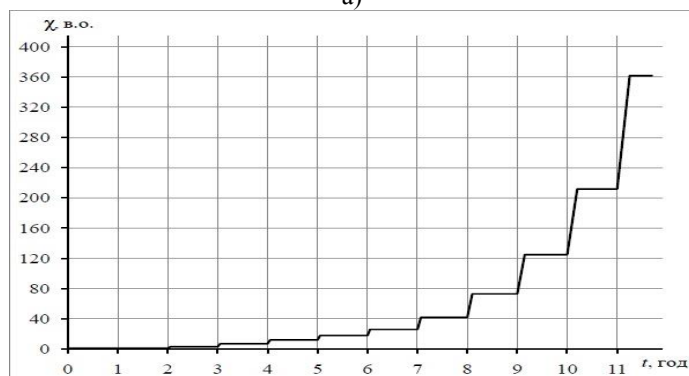
Якщо ЕМС працює зі знизеним навантаженням, то відносна зношеність ізоляції, як правило, нижча від номінального значення. Коли робоча температура вища припустимої, відносна зношеність перевищує одиницю. Таким чином, головна умова справного технічного стану - відносна зношеність ізоляції за певний період часу (цикл роботи, зміну тощо) не повинна перевищувати одиницю.

Для перевірки достовірності моделі (5, 6) для розрахунку залишкового ресурсу ЕМС з АД виконано експериментальне дослідження методом прискореного експерименту. Здійснено вимірювання параметрів (струмів і напруги) АД типу 4A90LB8Y3 ($P_H = 1,1$ кВт, $n_H = 750$ об/хв, $U_H = 380$ В, $\eta_H = 70\%$, $\cos\phi_H = 0,68$), визначення залишкового ресурсу та його порівняння з експериментально встановленим. Дослідження здійснено в умовах послідовного збільшення навантаження до 150% з дискретністю приблизно 5% та витримування на кожному рівні навантаження протягом однієї години (рис., а). АД навантажувалася за допомогою навантажувального пристрою «Тормоз ПТ-2,5М» в лабораторних умовах.

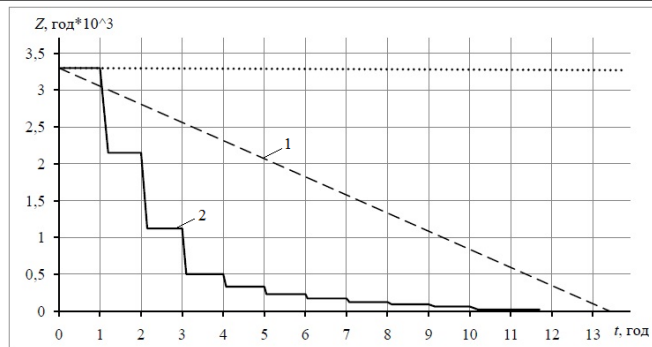
Результат прогнозування вказав (рис. б, в) на те, що АД повинен вийти з ладу в кінці 11 години роботи за даних умов експерименту. Фактично відмова двигуна відбулась в кінці 13 години. Відносна похибка прогнозування залишкового ресурсу за експериментом, обумовлена неточністю визначення початкового ресурсу та похибкою власне моделі старіння ізоляції, не перевищує 20%.



а)



б)



в)

Рисунок – Графіки зміни в часі: а – сумарних втрат потужності; б – зношування ізоляції; в – залишкового ресурсу (1 - експериментальне значення, 2 - прогнозоване)

Висновки. Удосконалено методичні засади визначення залишкового ресурсу потужних ЕМС при проведенні комплексного енергоаудиту, які дозволяють оцінювати скорочення строку служби у залежності від режиму навантаження і додаткових втрат, зумовлених несиметрією та несинусоїдальністю напруги. Експериментальна перевірка підтвердила достатню точність оцінки залишкового ресурсу ЕМС з АД. Відносна похибка прогнозування залишкового ресурсу за експериментом, обумовлена неточністю визначення початкового ресурсу та похибкою власне моделі старіння ізоляції, не перевищує 20%.

Список використаної літератури.

1. Ермолаев С.А. Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве: Учебник / С.А. Ермолаев, Е.П. Масюткин, В.Ф. Яковлев. – К.: Фирма “Инкос”, 2005. – 670 с.
2. Gill P. Electrical power equipment maintenance and testing / Paul Gill. – USA, CRC Press: 2008. – 1002 с.
3. Воробьев В.Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции / В.Е. Воробьев, В.Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.
4. Бурковский А.Н. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывонепроницаемого исполнения / А.Н. Бурковский, Е.Б. Ковалев, В.К. Коробов. – М.: Энергия, 1970. – 184 с.
5. Синчук О.Н. Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, С.Л. Михайлов // Электротехника, 2003, №3. С. 205-211
6. Определение допустимого тока статора взрывозащищенных асинхронных двигателей серии В, ВР в кратковременных режимах работы/ [А.Н. Бурковский, Т.О. Титкова, Т.П. Канашенкова, В.В. Макеев] // Электротехническая промышленность. Серия “Электрические машины”. Вып. 7(89). 1978г. – С.5-7.
7. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. – М.: Издательский центр “Академия”, 2003. – 384 с.
8. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
9. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
10. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – [2-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
11. Суднова В.В. Качество электрической энергии [Электронный ресурс]/ В.В. Суднова. – М.: Энергосервис, 2000. - Режим доступа <http://www.test-electro.ru>.

O. Zakladnyi, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2813-3692

V. Prokopenko Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-5518-5802

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

REMAINING RESOURCE ESTIMATION OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS FOR ENERGY AUDIT

The article deals with the determination of the residual life of high-power electromechanical systems in the energy audit. Maintaining performance through EMC repairs are not economically feasible. EMC characteristics renovated differ significantly from the newly issued by the manufacturer because the resulting operation and maintenance characteristics of structural change materialiv.Otsinka remaining resources needed to justify energy efficiency improvements electromechanical systems using the method of calculating the cost of the life cycle. In calculating life cycle cost LCC one of the main tasks is to determine the residual life of the equipment. The article shows that the lifetime of the electromechanical system is largely determined by the quality of the motor winding insulation. The main factor that affects the lifetime of the insulation is its operating

temperature. The most frequently used calculations heating exponentially, ie representation model motor thermal state differential equation. Is the most appropriate approach in which the calculation of the current temperature during isolation of complex electromechanical system powerful energy audit carried out by the actual losses in the electric motor mode the light load and additional losses due to asymmetry and nonsinusoidal voltage. The remaining resource in conducting energy audit determined based on measurement of parameters \rightarrow instantaneous values of voltage and current. Mathematical modeling has confirmed the adequacy of this approach to predicting the residual life of asynchronous motors. Experimental verification of the accuracy of prediction proved sufficient residual life. The relative error of prediction of residual life of the experiment due to inaccurate determination of the initial resource and the actual error model of aging insulation does not exceed 20%. The technique, considers only thermal aging and isolation during suffers even electrical and mechanical effects. We can assume that in fact its destruction as a result of the breakdown will take place much earlier.

Keywords: energy audits, life cycle cost, electromechanical systems, residual life.

References

1. S.A. Ermolaev, E.P. Masyutkin, and V.F. Yakovlev, *Operation of power equipment in agriculture: Textbook*. Kyiv, Ukraine: Firm "Inkos", 2005.
2. P. Gill, *Electrical power equipment maintenance and testing*. USA: CRC Press: 2008.
3. V.E. Vorobyov, and V.Ya. Coachman, *Forecasting the service life of electric machines: Written lectures*. St. Petersburg, Russia: SZTU, 2004.
4. A.N. Burkovsky, and E.B. Kovalev, *Heating and cooling of explosion-proof electric motors*. Moscow, Russia: Energiya, 1970.
5. O.N. Sinchuk, V.V. Chumak, and S.L. Mikhailov, "Thermal model of crane AD for diagnosing and setting up digital overload protection", *Electrical Engineering*, Ukraine, vol 3, 2003.
6. A.N. Burkovsky, T.O. Titkova, T.P. Kanashenkova, and V.V. Makeev, "Determination of the admissible stator current of explosion-proof induction motors of series B, BP in short-time operation modes", *Electrical engineering industry. A series of "Electric Machines"*. Volume. 7 (89), 1978.
7. N.F. Kotelenets, N.A. Akimova, and M.V. Antonov, *Tests, operation and repair of electric machines: Textbook for high schools*, Moscow, Russia: Publishing Center "Academy", 2003.
8. I.F. Filippov, *Heat transfer in electrical machines*, Leningrad, USSR: Energoatomizdat, 1986.
9. A.K. Shidlovsky, and V.G. Kuznetsov, *Improving the quality of energy in electrical networks*, Kyiv: Naukova Dumka, 1985.
10. I.V. Zhezhelenko, *Higher harmonics in power supply systems for industrial enterprises - [2-nd ed.]*, Moscow: Energoatomizdat, 1984.
11. V.V. Sudnova, *The quality of electrical energy [online]*, Available: <http://www.test-electro.ru>. Moscow: Energoservis, 2000.

УДК 621.311.001.57(063)

О.А. Закладной, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2813-3692

В.В. Прокопенко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-5518-5802

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА

В статье рассматриваются вопросы определения остаточного ресурса мощных электромеханических систем при проведении энергетического аудита. Оценка остаточного ресурса необходима для обоснования мероприятий по повышению энергоэффективности электромеханических систем с помощью метода расчета стоимости жизненного цикла. В статье показано, что срок службы электромеханической системы в значительной степени определяется качеством изоляции обмоток электродвигателя. Главным фактором, который влияет на срок службы изоляции, является ее рабочая температура. Чаще всего применяется расчет нагрева по экспоненте, то есть представления модели электродвигателя дифференциальным уравнением теплового состояния. Наиболее целесообразным является подход, при котором расчет текущей температуры изоляции при проведении комплексного энергоаудита мощной электромеханической системы осуществляется по фактическим потерям в электродвигателе с учетом режима нагрузки и дополнительных потерь, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью напряжения. Математическое моделирование и экспериментальная проверка подтвердила адекватность такого подхода к прогнозированию остаточного ресурса асинхронных двигателей.

Ключевые слова: энергетический аудит, стоимость жизненного цикла, электромеханическая система, остаточный ресурс.

Надійшла 30.03.2017

Received 30.03.2017

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 622.673.1

С.В. Зайченко, д-р техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-8446-5408
Н.А. Шевчук, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0003-0355-9793
В.В. Вапнічна, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0003-3938-4358
В. Диновська, студентка; ORCID 0000-0002-5678-6386
А.В. Квіщук, студент. ORCID 0000-0002-4889-1186

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОРИСНИХ КОПАЛИН ШЛЯХОМ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ГІРНИЧОТРАНСПОРТНИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті представлено новий підхід зменшення втрат цінного компоненту при збагаченні паливно-енергетичних корисних копалин шляхом використання модернізованого скребкового конвеєру. Для удосконалення технології збагачення паливно-енергетичних корисних копалин запропоновано модернізувати конструкцію скребкового конвеєра шляхом зміни кута скребка до напрямку руху гірничої маси. Отримані закономірності, які описують умови розділення компонентів, дозволять створити методику розрахунку геометричних параметрів скребкового конвеєру для збагачення вугілля за тертям.

Запропонована модернізація дає можливість поєднати в одному пристрої два технологічних процеси: збагачення та транспортування.

Ключові слова: скребковий конвеєр, скребок, жолоб, коефіцієнт тертя, кут нахилу скребка.

1. Вступ. В останні роки спостерігається тенденція зниження якості видобутого вугілля за рахунок збільшення зольності і ступеня подрібнення гірничої маси, тому реалізація ефективних методів сухого збагачення дрібних класів вугілля в умовах шахт є особливо актуальною [1-2]. Вугілля є одним із найважливіших видів паливно-енергетичної сировини. Частка вугілля у світовому енергетичному балансі складає близько 25%. Для потреб економіки Україна щорічно використовує близько 100 млн т вугілля, з яких майже 80 млн т видобувається вітчизняними підприємствами Донецького, Дніпровського і Львівсько-Волинського вугільних басейнів.

Вуглезбагачення – крупна підгалузь вугільної промисловості. Зі зростанням видобутку безперервно збільшується абсолютна маса вугілля, що направляється на збагачення, сортування і брикетування. Процеси збагачення вугілля полягають у розділенні гірничої маси на основі відмінностей у властивостях її складових (густини, змочуваності, крупності, твердості та ін.) Збагачення – це ряд послідовних дій, за допомогою яких відбувається відділення корисних компонентів від домішок [3-5].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Серед методів сухого збагачення гірничої маси, яка складається з компонентів, що мають різні коефіцієнти тертя, слід відзначити методи сухого збагачення за тертям. Для реалізації даного методу розділення гірничої маси запропоновано використати скребковий конвеєр, скребки якого поставлені під кутом, наближеним до кута тертя цінного компоненту до напрямку руху гірничої маси, скребки розділяють куски гірничої маси по довжині конвеєру і відділяють цінний компонент від породи по ширині конвеєра за рахунок різниці коефіцієнтів тертя породи і цінного компоненту по поверхні скребка. Модернізація даного елемента гірничотранспортного комплексу полягає в тому, щоб зменшити енергетичні і матеріальні втрати цінного компоненту при збагаченні шляхом використання скребкового конвеєру.

Процес збагачення паливно-енергетичних корисних копалин полягає в наступному (рис. 1). Гірничу масу подають в завантажувальний бункер 1, з якого вона поступає по шматкам (за допомогою шнекового живильника) на риштак скребкового конвеєра 3 між скребками 2. Скребок розташований під кутом α , який наближений до кута тертя цінного матеріалу (вугілля) по скребку 2. Внаслідок перевищення сил реакції $fmg \cdot \sin \alpha$ від взаємодії шматків цінного компоненту 4 і шматків породи 5 з скребком 3 над силами тертя $fmg \cdot \cos \alpha \cdot f$, за умови $f \leq \tan \alpha$, відбувається рух кусків з меншим значенням коефіцієнта тертя f відносно скребків 3. Розділені по ширині риштака шматки породи 5 і цінного компоненту 4 при розвантаженні потрапляють в розвантажувальні бункери цінного компоненту і породи.

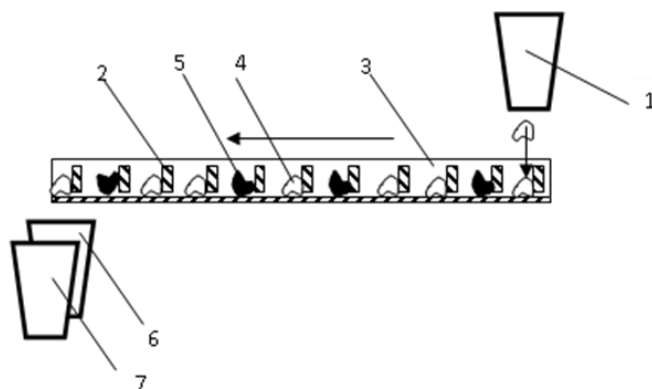


Рисунок 1 – Схема способу збагачення паливно-енергетичних корисних копалин:

1 – завантажувальний бункер гірничої маси; 2 - скребок; 3 – решітка скребкового конвеєра; 4 - куски цінного компоненту; 5 – куски породи; 6, 7 – розвантажувальні бункери цінного компоненту і породи.

Для створення методики розрахунку, яка дозволяє визначити геометричні параметри системи збагачення паливно-енергетичних корисних копалин необхідно розглянути механіку контактної взаємодії середовища і робочих органів (скребок) [6-8]. Існуючі закономірності механіки контактної взаємодії потребують уточнень, що враховують особливості процесів, які виникають при збагаченні паливно-енергетичних корисних копалин за тертям.

3. Формулювання мети роботи

Проведені дослідження ставили за мету встановлення закономірностей, які описують умови розділення компонентів, що дозволяють створити методику розрахунку геометричних параметрів процесу для збагачення паливно-енергетичних корисних копалин за тертям.

4. Виклад основного матеріалу

Розглянемо контактну взаємодію гірничої маси з робочими органами модернізованого скребкового конвеєра. Під дією скребка, цінний матеріал рухається по жолобу за допомогою скребка (рис. 2).

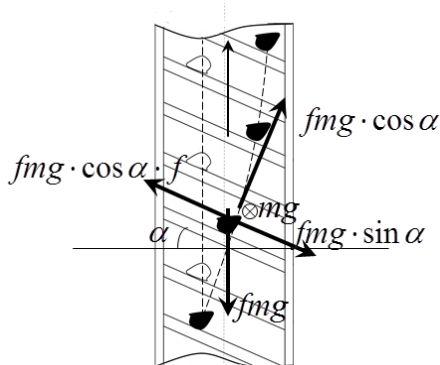


Рисунок 2 – Схема дії сил

Шматок під дією сили ваги $F = mg$ діє на жолоб, що в свою чергу викликає нормальну і дотичну складову реакцію (силу тертя). Опір, який виникає внаслідок переміщення даного тіла по поверхні іншого, під дією зовнішніх сил, спричиняє виникнення сили тертя. В даному випадку скребок розташований під кутом нахилу α , який наближений до кута тертя цінного матеріалу по скребку, що призводить до складного руху матеріалу і виникнення пари сил тертя: сила тертя відносно скребка $F_{mp.скр.} = mgf \cos \alpha$ та сила тертя відносно жолоба $F_{mp.ж.} = mgf$. При взаємодії скребка зі шматком матеріалу також виникає нормальна складова реакції $N = fmg \cos \alpha$. Оскільки, діє декілька сил, то результуюча сила – рівнодійна сила – знаходиться за правилом додавання векторів. Для двох сил це – правило паралелограма $R = F_{mp.ж.} + N$. Модуль рівнодійної сили знаходиться за теоремою косинусів:

$$R = \sqrt{F_{\text{тр.ж.}}^2 + N^2 - 2F_{\text{тр.ж.}} N \cos \alpha} = \sqrt{(mgf)^2 + (fmg \cos \alpha)^2 - 2mgf \cdot fmg \cos \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

Для забезпечення процесу розділення двох компонентів рівнодійна сила повинна перевищувати сили тертя:

$$F_{\text{тр.ж.}} \leq R \quad (2)$$

Використав рівняння (1) для нерівності (2) отримаємо умову процесу збагачення за тертям:

$$\alpha \geq \arctgf \quad (3)$$

З рис. 3 видно, як змінюється кут повороту скребка α від коефіцієнту тертя f . На рисунку відділено три області, які характеризують процес збагачення за тертям при різному куту нахилу скребка: у першій – відсутність відносного переміщення цінного компоненту і породи, у другій – буде відбуватись тільки рух цінного компоненту, оскільки $f_a < f_i$, у третій – відбуватиметься рух як цінного компоненту, так і породи.

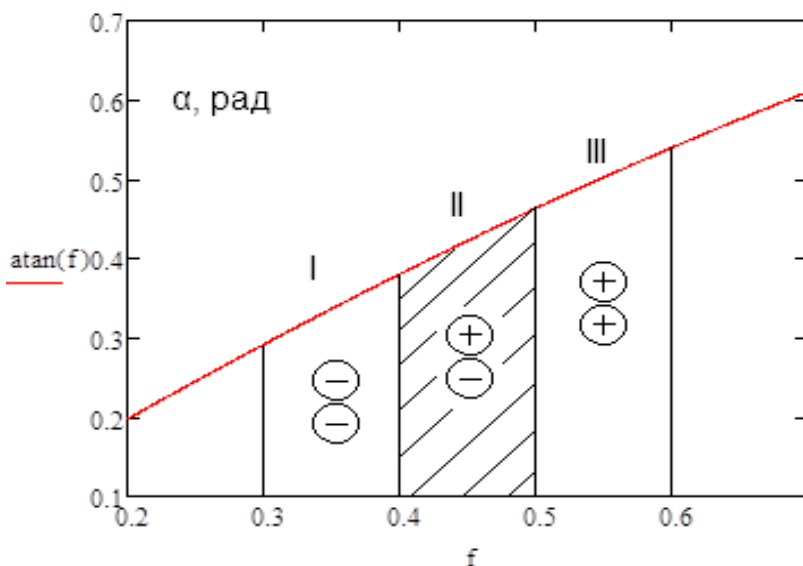


Рисунок 3 – Графік руху цінного компоненту та породи.

Авторами було проведено експериментальні дослідження для збагачення цінного компонента (кам'яного вугілля) за допомогою скребкового конвеєра. Нижче схематично зображена схема експериментальної установки (рис. 4), яка працює наступним чином. Персональний комп'ютер 1 подає сигнал до мікроконтролера 2 - ArduinoNanoATmega328, який у свою чергу відправляє його до драйвера 3 ТВ6560, що забезпечують живлення та керування шаговим двигунам 4-17HS8401. Осі шагових двигунів обертаються в одну сторону, при чому відбувається рух зубчастого ремня 5, що у свою чергу забезпечує рух штока 7, який закріплений в підшипниках 6. До кінця штока за допомогою шайб 9 прикріплений скребок 10, під відповідним кутом α . Скребок рухається по металевій пластині, на якій є два експериментальних шматка: вугілля 13 та породи 12. При русі штока відбувається рух цінного компонента і породи. Внаслідок різниці коефіцієнтів тертя цінного компонента менше і породи $f_a < f_i$ спостерігається рух цінного компонента відносно скребка.

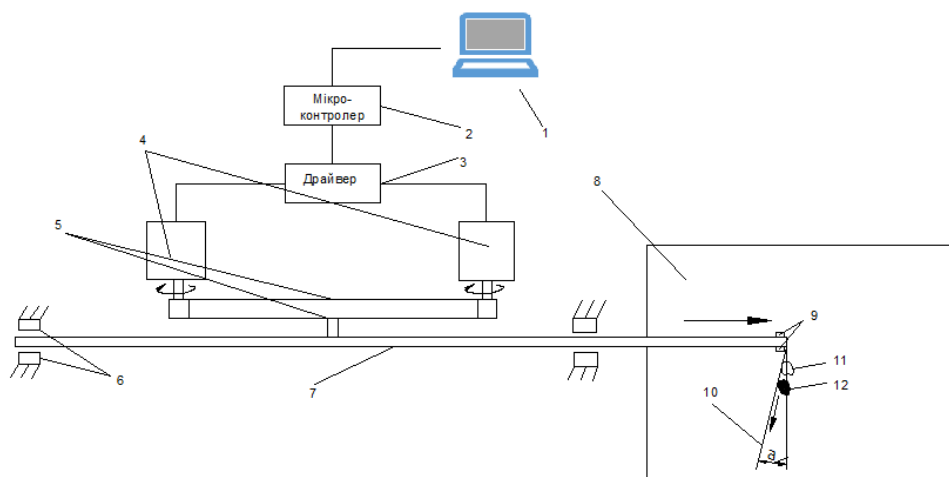


Рисунок 4 – Схема експериментальної установки



Рисунок 5 – Зображення експериментальної установки збагачення

На рис. 6 зображений рух цінного компонента та породи, відносно скребка, який повернутий під кутом α . Можливо відзначити, що шматок вугілля поступово зсувається на периферію металевій пластини, при чому шматок породи не змінює свого положення відносно скребка.



Рисунок 6 – Зображення результату експерименту

Висновки

Було розроблено новий спосіб збагачення паливно-енергетичних корисних копалин шляхом модернізації елементів гірничотранспортних комплексів, який порівняно з традиційним (вологим) забезпечує зменшення втрат енергії і матеріалів. Модернізація конструкції скребкового конвеєра з метою збагачення вугілля можлива шляхом зміни кута скребка до напрямку руху гірничої маси.

Встановлено умову процесу збагачення за тертям. Так для сталого процесу збагачення за тертям кут нахилу скребка повинен знаходитись між значеннями кутів тертя цінного компоненту і породи.

Проведенні експериментальні дослідження підтвердили можливість процесу сухого розділення двох компонентів за тертям шляхом дії нахиленого під кутом тертя скребком конвеєра. Різниця між теоретичними і експериментальними значеннями склала 5-7 %, що підтверджує правомірність отриманих теоретичних закономірностей.

Список використаної літератури

1. Зайченко С.В. Моделирование избирательного дробления по трению / С.В. Зайченко, А.Н. Соколовский // Научный вестник московского государственного горного университета. – 2013. – Вип. 8. – С. 88-90.
2. Зайченко С.В. Обогащение горной массы по прочности / С.В. Зайченко, А.С. Коцур // Научный вестник московского государственного горного университета. – 2013. - Вип. 9. – С. 53-56.
3. Смирнов В.О. Переработка і якість корисних копалин / В.О. Смирнов, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2005. – 324 с.
4. Збагачення вугілля [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу : https://uk.wikipedia.org/wiki/Збагачення_вугілля.
5. Що таке збагачення вугілля і як воно робиться [Електронний ресурс] – Режим доступу : polynet.com.ua/shho-take-zbagachennya-vugillya-i-yak-vono-robitsya.html.
6. Зайченко С.В. Контактна взаємодія робочих органів безвібраційних бетоноформуєчих агрегатів при виробництві пустотних панелей : дис... канд. техн. наук: 05.05.02 /; Київський національний ун-т будівництва і архітектури. - К., 2001.
7. Зайченко С.В. Наукові основи формування геотехнічних властивостей приконтурного шару і обробки тунелів роликівим ущільненням : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.09 /; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - Київ, 2014. - 36 с.
8. Шевчук С.П. Аналитическое исследование процесса мехатронной вибрационной системы резания горной породы плоскими резаками шнекового бура / С.П. Шевчук, С.В. Зайченко // Науковий вісник НГУ – 2016. - Вип. 3. – С. 29-34.

S. Zaychenko, Dr. Sc. Sciences., Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-8446-5408

N. Shevchuk, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-0355-9793

V. Vapnichna, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-3938-4358

O. Dynovska, student; **ORCID** 0000-0002-5678-6386

A. Kvishchuk, student. **ORCID** 0000-0002-4889-1186

S. Zaychenko, N. Shevchuk, V. Vapnichna, O. Dynovska, A. Kvishchuk

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF BENEFICIATION OF ENERGY MINERALS

MODERNIZING ELEMENTS OF THE TRANSPORT COMPLEX

The paper presents a new approach to reduction of losses of valuable component in the enrichment by use of scraper conveyor. With the aim of modernising the design of the scraper conveyor by changing the angle of the scraper to the direction of movement of the rock mass.

The dependence patterns in the movement of material allows to verify the correctness of this upgrade, which is also confirmed by experiment.

The proposed upgrade provides the opportunity to combine in one device two options: enrichment and transport.

Keywords: scraper conveyor, scraper, gutter, strength ratio, the angle of inclination of the scraper.

References

1. Zaichenko S. Simulation of selective crushing Friction / SV Zaichenko, AN Sokolovsky // Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University. - 2013. - Vip. 8. - P. 88-90.
2. Zaichenko S. Enrichment of the rock mass strength / SV Zaichenko, AS Kocur // Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University. - 2013. - Vip. 9. - P. 53-56.
3. Smirnov VO Pererobka i yakist korisnih Kopalyn / VO Smirnov, VS Biletsky. - Donetsk: Shidny vidavnychy Dim, 2005. - 324 p.
4. Coal [electronic resource]. - 2015. - Access: https://uk.wikipedia.org/wiki/Збагачення_вугілля.
5. What is the enrichment and how it is [electronic resource] - Access: polynet.com.ua/shho-take-zbagachennya-vugillya-i-yak-vono-robitya.html.
6. Zaichenko S. Contact interaction of working bodies bezvibratsiynih betonoformuyuchyih units in the production of hollow panels: Thesis ... candidate. Sc. Sciences: 05.05.02 /; Kyiv National University of Construction and Architecture. - K., 2001.
7. Zaichenko S. The scientific basis for the formation of geotechnical properties marginal layer processing and tunnels roller compaction: Author. Dis. ... Dr. Sc. Sciences: 05.15.09 /; Nat. Sc. University of Ukraine "Kyiv. Polytechn. Inst." - Kyiv, 2014. - 36 p.
8. Shevchuk SP Analytical study of the process of mechatronic vibration rock cutting system cutters flat auger / SP Shevchuk SV Zaichenko // Scientific Bulletin of National Mining University – 2016 – Vip. 3. – P. 29 – 34.

УДК 622.673.1

С.В. Зайченко, д-р техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-8446-5408

Н.А. Шевчук, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0003-0355-9793

В.В. Вапничная, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0003-3938-4358

А.В. Диновская, студентка; ORCID 0000-0002-5678-6386

А.В. Квищук, студент. ORCID 0000-0002-4889-1186

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ТОПЛИВО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ПУТЁМ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ
ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

В статье представлен новый подход уменьшения потерь ценного компонента при обогащении топливо-энергетических полезных ископаемых путем использования модернизированного скребкового конвейера. Для усовершенствования технологии обогащения топливо-энергетических полезных ископаемых предложено модернизировать конструкцию скребкового конвейера путем изменения угла скребка к направлению движения горной массы.

Полученные зависимости, которые описывают условия деления компонентов позволяют создать методику расчёта геометрических параметров скребкового конвейера для обогащения угля трением.

Предложена модернизация дает возможность совместить в одном устройстве два технологических процесса: обогащение и транспортировку.

Ключевые слова: скребковый конвейер, скребок, желоб, коэффициент прочности, угол наклона скребка.

Надійшла 13.12.2016

Received 13.12.2016

В.О. Бржезицький, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-9768-7544
І.М. Маслюченко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-6073-9649
М.Ю. Лапоша, аспірант, ORCID 0000-0003-0909-7876
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ГРАНИЧНИЙ ВПЛИВ НЕІДЕНТИЧНОСТІ R-, C-ЕЛЕМЕНТІВ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПОДІЛЬНИКА НАПРУГИ НА ЙОГО ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

У статті розглянуто вплив неідентичності резистивних та ємнісних елементів високовольтного плеча змішаного подільника напруги на його частотні характеристики. Одержані аналітичні вирази для дослідження впливу неідентичності елементів високовольтного подільника напруги при граничному дискретному розподіленні цих елементів. Показано, що при даному дискретному розподіленні резистивних та ємнісних елементів вплив їх неідентичності на амплітуди коливань амплітудно-частотної характеристики та фазо-частотної характеристики подільника напруги збільшується більше ніж у п'ять разів по відношенню до «трикутного» розподілення параметрів елементів при рівних значеннях їх максимальних відхилень (від середніх значень). Отримані в статті результати рекомендується використовувати для оцінки «зверху» впливу неідентичності резистивних та ємнісних елементів високовольтного подільника напруги на його частотні характеристики.

Ключові слова: високовольтний подільник напруги, неідентичність елементів, амплітудно-частотна характеристика, фазо-частотна характеристика

Вступ. Потреби зростання повноцінності інформації про стан електротехнічних об'єктів та їх характеристики викликають необхідність розвитку методів і засобів вимірювань високої напруги для сталих і перехідних режимів. Сучасна вимірювальна техніка надає можливість експериментального визначення умовно названих «низьких» напруг промислової частоти (~10...100 В) до рівня невизначеності вимірювань ~ 0,05% [1]. Але виникає питання допустимої невизначеності вимірювань високої напруги, зокрема, для контролю якості електроенергії [2 – 4] та інших цілей. При цьому верхня межа частоти складових напруги досягає 148,5 кГц і вище [3]. В зв'язку з цим в [5, 6] поставлене питання про стабільність частотних характеристик високовольтних подільників напруги (ВПН), як єдиного засобу, що допускає вимірювання високих напруг в діапазоні частот від нуля до одиниць та десятків мегагерц.

Тематика розвитку досліджень подільників напруги в останній час набуває особливої актуальності, в зв'язку з перспективою заміни ними традиційних високовольтних електромагнітних трансформаторів напруги в концепції «цифрова підстанція» [7].

В цьому відношенні показовим є розвиток досліджень високовольтних подільників напруги в останніх зарубіжних публікаціях [8 – 13].

Так, в [8] запропонований метод «подвоєння напруги», що дозволяє виявити нестабільність коефіцієнта ділення ВПН від 10 до 500 кВ на рівні 1 мВ/1 кВ, тобто 10^{-6} відносних одиниць, або 0,0001%.

В [9] запропонований метод дослідження зміни коефіцієнту ділення ВПН промислової частоти за допомогою порівняння з трансформаторами напруги до $110/\sqrt{3}$ кВ.

В [10] досліджена модель ВПН з використанням методу оцінки струмів витоку в його конструкції, що забезпечує невизначеність вимірювання його коефіцієнта ділення до 4×10^{-6} відносних одиниць, або 0,0004%.

В [11] показано, що при використанні стабілітронів в якості структурних елементів ВПН, невизначеність вимірювання його коефіцієнта ділення може досягати 0,0005%.

В [12] відпрацьована нова конструкція модулів резисторів та виконана оцінка невизначеності вимірювання зміни коефіцієнта ділення ВПН до 1000 кВ на рівні 0,0005%.

В [13] показана важливість використання в схемі ВПН резисторів з допуском $\pm 1\%$ для досягнення його високої точності, обговорюється можливість приєднання ємнісної складової до схеми резистивного ВПН для розширення його робочого діапазону частот.

В аналітичних дослідженнях високовольтних подільників напруги значення опорів та ємностей їх

елементів, зазвичай, обираються ідентичними, або ж такими, що змінюються за заданим законом. Але навіть у випадку «ідеального» початкового підбору елементів значення їх опору і ємностей можуть змінюватись у часі, що пов'язано з впливом зовнішніх умов та ряду факторів. Тому виникає необхідність розглядати характеристики подільника напруги з урахуванням неідентичності його елементів.

Високовольтне плече подільника змішаного типу можна розглядати у вигляді кола, що містить n паралельно-послідовно з'єднаних резистивних та ємнісних елементів R_i, C_i (рис. 1), де R_i, C_i – відповідно, елементи високовольтного плеча, r, x – елементи низьковольтного плеча подільника напруги [5].

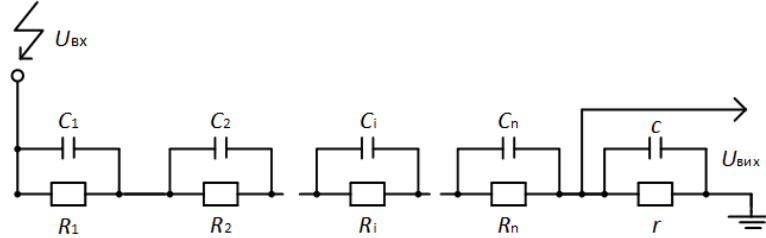


Рисунок 1 – Схема високовольтного подільника напруги змішаного типу за [5]

В [5] одержані загальні вирази для залежності амплітудно-частотної A та фазо-частотної φ характеристик ВПН від безрозмірного параметра частоти $\gamma = \omega R_0 C_0$, де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота, R_0, C_0 – усереднені значення R, C -елементів високовольтного плеча:

$$R_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad C_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

$$A = \frac{1}{k} A^*, \quad A^* = \sqrt{\frac{1+\gamma^2}{\left(1+\frac{k-1}{k}f\right)^2 + \gamma^2 \left(1+\frac{k-1}{k}\delta\right)^2}}, \quad (1)$$

$$\varphi = \text{arctg} \left[\frac{(\delta-f)\gamma}{f + \frac{k}{k-1} + \gamma^2 \left(\delta + \frac{k}{k-1}\right)} \right], \quad (2)$$

де k – номінальне значення коефіцієнта ділення подільника напруги, відповідно до якого визначаються:

$$r = \frac{nR_0}{k-1}, \quad c = \frac{C_0}{n} (k-1), \quad (3)$$

а параметри $f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i$, $\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i$ враховують усереднені по елементам високовольтного плеча функції неідентичності його елементів $\alpha_i = \frac{C_i - C_0}{C_0}$, $\beta_i = \frac{R_i - R_0}{R_0}$ у вигляді виразів:

$$D_i = \frac{\gamma^2 (T_i + \gamma^2 S_i)}{(1+\gamma^2)[1+\gamma^2(1+\beta_i)^2(1+\alpha_i)^2]}, \quad (4)$$

$$G_i = \frac{\beta_i^2 + 2\alpha_i\beta_i + \alpha_i\beta_i^2 + \gamma^2(P_i + \gamma^2 Q_i)}{(1+\gamma^2)[1+\gamma^2(1+\beta_i)^2(1+\alpha_i)^2]}, \quad (5)$$

де $Q_i = \alpha_i^2(1 + \alpha_i)(1 + \beta_i)^2$,

$$T_i = -(6\alpha_i\beta_i + 6\alpha_i\beta_i^2 + 2\alpha_i\beta_i^3 + \alpha_i^2 + 3\alpha_i^2\beta_i + 3\alpha_i^2\beta_i^2 + \alpha_i^2\beta_i^3 + 3\beta_i^2 + \beta_i^3),$$

$$S_i = 2\alpha_i\beta_i + 4\alpha_i\beta_i^2 + 2\alpha_i\beta_i^3 + 3\alpha_i^2 + 7\alpha_i^2\beta_i + 5\alpha_i^2\beta_i^2 + 2\alpha_i^3 + 4\alpha_i^3\beta_i + 2\alpha_i^3\beta_i^2 + \beta_i^2 + \beta_i^3 + \alpha_i^2\beta_i^3,$$

$$P_i = -(6\alpha_i\beta_i + 9\alpha_i\beta_i^2 + 4\alpha_i\beta_i^3 + 3\alpha_i^2 + 8\alpha_i^2\beta_i + 7\alpha_i^2\beta_i^2 + 2\alpha_i^2\beta_i^3 + \alpha_i^3 + 2\alpha_i^3\beta_i + \alpha_i^3\beta_i^2 + 3\beta_i^2 + 2\beta_i^3).$$

Слід зазначити, що вирази (1 – 5) одержані в [5] у загальному випадку, без допущення малості параметрів $\alpha_i, \beta_i, \gamma$. У випадку відсутності неідентичності R_i, C_i елементів $\alpha_i = 0, \beta_i = 0$, з (4), (5) одержимо $f \equiv 0, \delta \equiv 0$, і відповідно $A^* \equiv 1$ (1) та $\varphi \equiv 0$ (2).

Мета та завдання. В попередній роботі [5] були розраховані залежності $A^*(\gamma), \varphi(\gamma)$ для неідентичності конденсаторів та резисторів високовольтного плеча подільника напруги, що відповідає

випадку «трикутного» закону рівнобічного розподілення вірогідності «випадання» $p(\alpha)$, $p(\beta)$ при максимальних значеннях відхилень $\alpha_{\max} = \pm\Delta_1$, $\beta_{\max} = \pm\Delta_2$.

Метою даного дослідження є визначення граничного впливу неідентичності R -; C -елементів високовольтного плеча змішаного високовольтного подільника напруги на його амплітудно- та фазо- частотні характеристики.

В роботі, для досягнення мети вирішувались наступні наукові задачі:

- побудова математичної моделі високовольтного подільника напруги, з урахування граничного впливу неідентичності R_i , C_i – елементів високовольтного плеча;

- визначення впливу неідентичності R_i , C_i – елементів при використанні різних значень відхилень від середніх значень ємності конденсаторів та опору резисторів високовольтного плеча подільника напруги.

Матеріал та результати дослідження. Оскільки кількість n – елементів високовольтного плеча досягає сотень і тисяч одиниць, необхідно в подальшому при знаходженні f , δ переходити до функцій статистичного розподілення α , β . За матеріалами [5], можливим для практики є «трикутне» розподілення α , β . Але граничний вплив на частотні характеристики ВПН буде здійснювати неідентичність R -; C -елементів дискретного типу, коли половина конденсаторів високовольтного плеча буде мати ємність $C_0(1 - \Delta_1)$, а друга половина характеризуватиметься ємністю $C_0(1 + \Delta_1)$. Аналогічно, резистори будуть мати значення $R_0(1 - \Delta_2)$ та $R_0(1 + \Delta_2)$. Оскільки «випадання» цих значень елементів високовольтного плеча є рівновірогідним, функції f , δ у виразах (1 – 3) наберуть вигляд:

$$f = \frac{1}{4} \left[\begin{matrix} D(\alpha_i = -\Delta_1; \beta_i = -\Delta_2) + D(\alpha_i = -\Delta_1; \beta_i = \Delta_2) + \\ D(\alpha_i = \Delta_1; \beta_i = -\Delta_2) + D(\alpha_i = \Delta_1; \beta_i = \Delta_2) \end{matrix} \right], \quad (6)$$

$$\delta = \frac{1}{4} \left[\begin{matrix} G(\alpha_i = -\Delta_1; \beta_i = -\Delta_2) + G(\alpha_i = -\Delta_1; \beta_i = \Delta_2) + \\ G(\alpha_i = \Delta_1; \beta_i = -\Delta_2) + G(\alpha_i = \Delta_1; \beta_i = \Delta_2) \end{matrix} \right], \quad (7)$$

де $D(\alpha_i; \beta_i)$, $G(\alpha_i; \beta_i)$ – функції α_i ; β_i за (4), (5).

Якщо підставити ці значення f , δ у формули (1), (2) можна дослідити вплив неідентичності R -; C -елементів дискретного типу на амплітудно-частотну характеристику A (АЧХ) та фазочастотну характеристику φ (ФЧХ) високовольтного подільника напруги.

Згідно (1) – (7), за допомогою пакету MATLAB, розраховуємо величини невизначеності за напругою $A' = (A^* - 1) \times 100\%$ та невизначеності за кутом φ ВПН в залежності від безрозмірного параметра частоти γ , якому надаються значення:

$$\gamma = 10^{-3}; 10^{-2.75}; 10^{-2.5}; 10^{-2.25}; 10^{-2}; 10^{-1.75}; 10^{-1.5}; 10^{-1.25}; 10^{-1}; 10^{-0.75}; 10^{-0.5}; 10^{-0.25}; 10^0; 10^{0.25}; 10^{0.5}; 10^{0.75}; 10^1; 10^{1.25}; 10^{1.5}; 10^{1.75}; 10^2; 10^{2.25}; 10^{2.5}; 10^{2.75}; 10^3.$$

Оскільки коефіцієнти ділення ВПН звичайно $k \gg 1$, його конкретне значення в (1, 2) не є визначальним. У зв'язку з цим при проведених розрахунках в (1, 2) використовувалось «типове» значення $k = 10^4$.

На рис. 2 побудовані одержані залежності $A'(\%)$ та $\varphi(')$ ВПН від параметра γ , який змінюється в діапазоні від 10^{-3} до 10^3 відносних одиниць.

Порівнюючи дані рис. 2 з відповідними даними рис. 3 [5] приходимо до висновку, що перехід від «трикутного» розподілення неідентичності R -елементів до граничного дискретного розподілення, прийнятого в даній роботі, при рівних значеннях максимального відхилення $\alpha = \pm 0,01$ ($\pm 1\%$) збільшує «амплітуду» коливань АЧХ та ФЧХ високовольтного подільника напруги у 5,68 рази (як по $A'(\%)$, так і по $\varphi(')$). Зберігається квадратична залежність амплітуд коливань АЧХ та ФЧХ ВПН від розміру граничного відхилення Δ_2 [5].

В подальшому було розраховано залежність $A'(\%)$, $\varphi(')$ від γ для «протилежних» значень $\Delta_1 = 0,01$ та $\Delta_2 = 0$, яка представлена на рис. 3

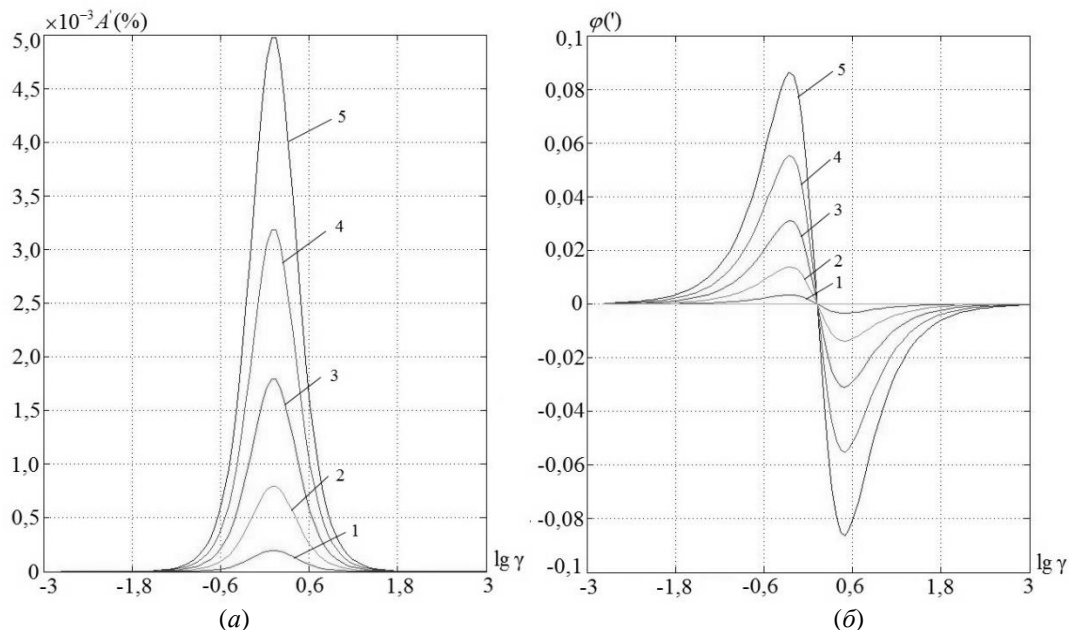


Рисунок 2 – Залежності невизначеності за напругою $A'(\%)$, вираженою у відсотках, (а) та невизначеності за кутом $\varphi(')$, вираженою у кутових хвилинах, (б) ВПН від безрозмірного параметру частоти γ для значень $\Delta_2 = 0,002$ (позначення 1); $\Delta_2 = 0,004$ (позначення 2); $\Delta_2 = 0,006$ (позначення 3); $\Delta_2 = 0,008$ (позначення 4); $\Delta_2 = 0,01$ (позначення 5) при значенні $\Delta_1 = 0$

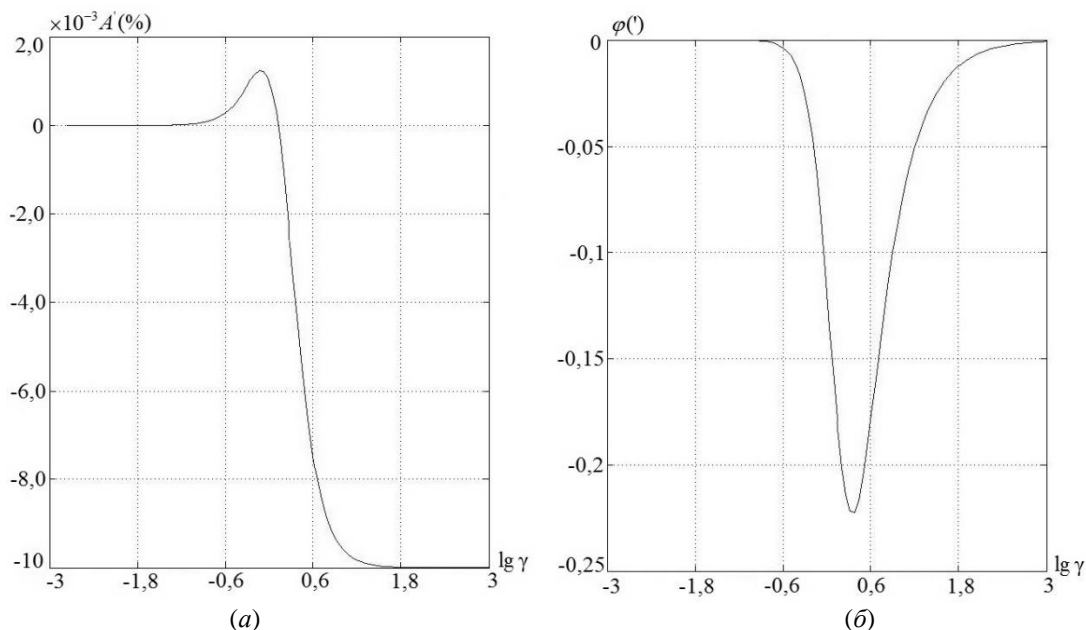


Рисунок 3 – Залежність невизначеності за напругою $A'(\%)$ (а) та невизначеності за кутом $\varphi(')$ (б) ВПН від безрозмірного параметру частоти γ для значень $\Delta_1 = 0,01$ та $\Delta_2 = 0$

Порівнюючи амплітуди коливань АЧХ та ФЧХ ВПН, представлених на рис. 3, з відповідними даними рис. 2 (позначення 5) приходимо до висновку, що вплив неідентичності С-елементів (порівняно до неідентичності R-елементів) є у 2,26 разів сильнішим для АЧХ та у 2,58 разів сильнішим для ФЧХ високовольтного подільника напруги.

На рис. 4 зображено сімейство залежностей $A'(\%)$, $\varphi(')$ від γ для значення $\Delta_1 = 0,04$ при значеннях $\Delta_2 = 0,000; 0,002; 0,004; 0,006; 0,008; 0,01$.

Аналіз одержаних залежностей показує, що вони практично співпадають між собою. Збільшення Δ_2 від 0 до 0,01 (при загальному значенні $\Delta_1 = 0,04$) збільшує амплітуду коливань АЧХ всього лиш у 1,021 рази, а відповідну амплітуду коливань ФЧХ – у 1,029 рази. Таким чином, можна зробити висновок,

що при значеннях $\Delta_1 \geq 0,04$ (4%), вплив неідентичності резисторів $\Delta_2 = 0,01$ (1%) є нехтуваним.

Порівняння залежностей $A'(\%)$ та $\varphi(^{\circ})$ від γ для значень $\Delta_1 = 0,125$ та $\Delta_2 = 0,01$ у випадках розглянутого в даній роботі дискретного та «трикутного» [5] розподілення показує збільшення амплітуди коливань АЧХ у 5,67 разів та ФЧХ – у 5,70 разів. Аналогічні результати при порівнянні дискретного та «трикутного» розподілень неідентичності R-, C-елементів ВПН мають місце для інших сполучень параметрів Δ_1 та Δ_2 .

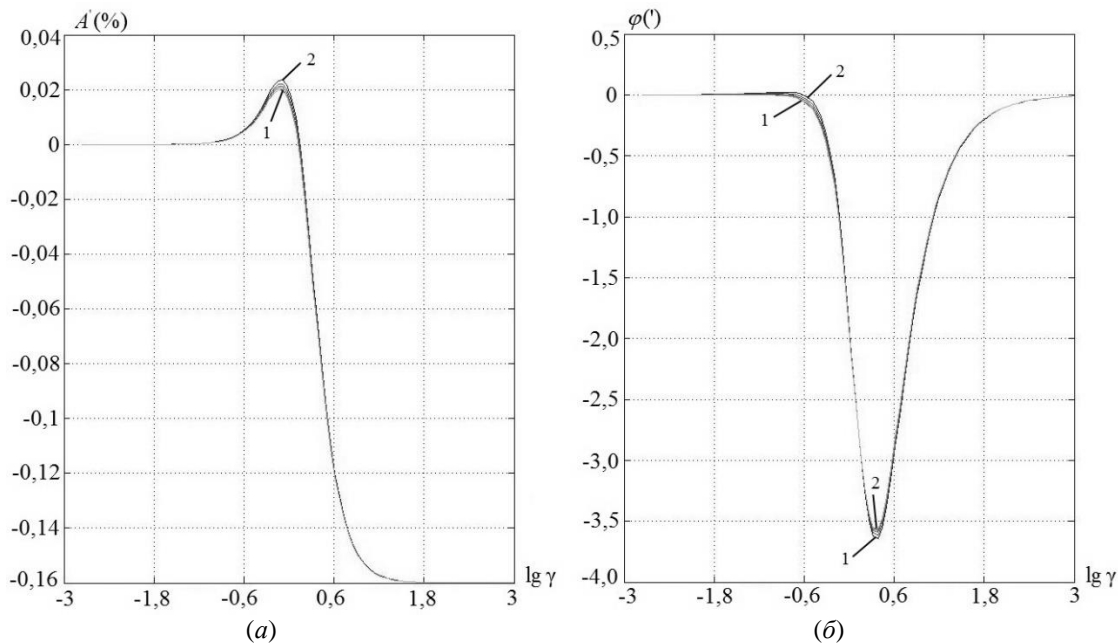


Рисунок 4 – Залежності невизначеності за напругою $A'(\%)$ (а) та невизначеності за кутом $\varphi(^{\circ})$ (б) ВПН від безрозмірного параметру частоти γ для фіксованого $\Delta_1 = 0,04$ при зміні значень Δ_2 в діапазоні: 0,000; 0,002; 0,004; 0,006; 0,008; 0,01, при цьому нульовому значенню Δ_2 відповідає позначенню 1, а максимальному значенню Δ_2 – позначення 2

Висновки

1. Вперше одержані аналітичні вирази, що дозволяють досліджувати спільний вплив неідентичності R-, C-елементів високовольтного плеча змішаного ємнісно-омічного подільника напруги на його амплітудно- та фазо-частотні характеристики для граничного дискретного розподілення цих елементів.

2. Перехід від «трикутного» закону розподілення неідентичності R-, C-елементів високовольтного плеча до граничного дискретного розподілення цих елементів з рівними значеннями їх максимальних відхилень Δ_1 , Δ_2 приводить до збільшення амплітуд коливань їх амплітудно- та фазо-частотних характеристик у 5,67 – 5,70 разів.

3. Показано, що найбільший вплив неідентичності R-, C-елементів високовольтного плеча на його частотні характеристики проявляється при його граничному дискретному розподіленні, яке може розглядатись як найгірший варіант впливу неідентичності складових елементів високовольтного плеча подільника напруги.

Список використаної літератури

1. Івашенко М. М. Аналіз існуючих еталонів електричної напруги змінного струму / М. М. Івашенко, В. А. Єрмолаєв // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – № 4. – С. 104–106.
2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Киев: Госстандарт Украины – 1999. – 31 с. Введ. с 01.01.2000.
3. EN 50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks. – 2010. – 45 p.
4. ДСТУ ІЕС 61000-4-30. Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (ІЕС 61000-4-30:2008, ІДТ). – 2010. – 56 с.
5. Бржезицький В. О. Частотні характеристики, обумовлені неідентичністю R, C-елементів високовольтного подільника напруги, призначеного для вимірювання показників якості електроенергії / В. О. Бржезицький, О. М. Десятов, І. М. Маслюченко, І. С. Яценко // Наукові праці НУХТ. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 158 – 172.

6. Бржезицький В. О. Коректування частотних характеристик високовольтних подільників напруги / В. О. Бржезицький, Є. О. Троценко, О. В. Петренко // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – Київ: "Політехніка", 2008. – С. 478-480.
7. ДСТУ ІЕС 61850-3. Комунікаційні мережі та системи на підстанціях. Частина 3. Загальні технічні вимоги (ІЕС 61850-3:2002, IDT). – 2013. – 16 с.
8. Qian L. Method to Determine the Ratio Error of DC High-Voltage Dividers / L. Qian, W. Leren, Z. Shuhan, T. Yuejin, X. Yan // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2012. – Vol. 61, №. 4. – P.1072-1078.
9. Haiming S. The voltage coefficient determination of high-voltage capacitive divider by serial summation of voltage transformers / S. Haiming, L. Bo, L. Feipeng, D. Dongxue, L. Zhi // Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014). – 2014. – P. 772-773.
10. Feipeng L. Research on voltage variation of DC high-voltage resistive divider by Measuring Leakage Current / L. Feipeng, Huang hui Zhang, S. Haiming, L. Bo // Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014). – 2014. – P. 384-385.
11. Merev A. A Reference System for Measuring High-DC Voltage Based on Voltage References / A. Merev, J.K. Hallstrom // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2015. – Vol. 64, №. 1. – P. 184-189.
12. Yi L. Development of Precision DC High-Voltage Dividers / L. Yi, M. K Ediriweera, F. S. Emms, A. Lohrasby // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2011. – Vol. 60, №. 7. – P. 2211-2216
13. Prochazka R. Precise 10 and 20 kV DC/AC resistive divider / R. Prochazka, J. Hlavacek, K. Draxler, R. Styblikova // Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – 2013. – P. 774-777.

V. Brzhezyskiy, Dr. Sc. Sciences, prof., **ORCID** 0000-0002-9768-7544

I. Maslyuchenko, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0001-6073-9649

M. Laposha, Ph.D student, **ORCID** 0000-0003-0909-7876

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

MAXIMUM INFLUENCE OF NONIDENTICAL R- AND C-ELEMENTS OF A HIGH-VOLTAGE DIVIDER ON ITS FREQUENCY CHARACTERISTICS

This paper describes the impact of non-identical resistive and capacitive elements of high-voltage arm of mixed voltage divider on its frequency characteristics. The authors emphasized the general features and substantiated main shortcomings of existing methods of calculating the characteristics of high-voltage dividers. The analytical expressions received for influence study of non-identical elements of a high-voltage divider at extreme discrete distribution of these elements. Feature of the received analytical expressions is that they are valid for any values of not identity as for resistive, and capacitive elements, and also their cumulative action. It is shown that the selected discrete distribution of resistive and capacitive elements influence of their not identity on fluctuations of amplitude frequency response and the phase-frequency characteristic of a voltage divider increases more than five times in relation to "triangular" distribution of parameters of elements in case of equal values of their maximum deviations (from mean values). The maximum influence of not identity of resistive and capacitive elements of a high-voltage arm on its frequency characteristics was studied. The influence becomes significant at its extreme discrete distribution and can be considered as the worst case of influence of not identity of the components of a high-voltage arm of a voltage divider. The results received in the article are recommended for assessment "from above" of influence of not identity of resistive and capacitive elements of a high-voltage divider on his frequency characteristics that allows to define possible values of not identity of elements of a high-voltage arm depending on permissible instability of frequency characteristics of the voltage divider.

Keywords: high-voltage divider, the non-identical elements, the amplitude-frequency characteristic, the phase-frequency characteristic

References

1. Ivashchenko M. M., Yermolaiev V. A. (2010). Analiz isnuichykh etaloniv elektrychnoi napruhy zminnoho strumu. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku*, №. 4, 104–106.
2. GOST 13109. Normy kachestva jelektricheskoi jenerгии v sistemah jelektronsabzhenija obshhego naznachenija (1997). 31.
3. EN 50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks. (2010). 45.
4. DSTU IEC 61000-4-30. Elektromahnitna sumisnist. Chastyna 4-30. Metody vyprobuvannia ta vymiriuvannia. Vymiriuvannia pokaznykiv yakosti elektrychnoi enerhii (IEC 61000 – 4-30:2008, IDT). – 2010 – 56.

5. Brzhezyskyi V. O., Desiatov O. M., Masliuchenko I. M., Yatsenko I. S. (2017). Chastotni kharakterystyky, obumovleni neidentychnistiu R, C-elementiv vysokovoltnoho podilnyka napruhy, pryznachenoho dlia vymyruvannia pokaznykiv yakosti elektroenerhii. *Naukovi pratsi NUKhT*, T. 23, № 1, 158 – 172.
6. Brzhezyskyi V. O., Trotsenko Ye. O., Petrenko O. V. (2008). Korektuvannya chastotnih kharakteristik visokovoltnih podilnykiv napruhi. *Dopovidi za materialami Mizhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi konferentsiyi molodih uchenih, aspirantiv i studentiv "Suchasni problemy elektroenergotekhniky ta avtomatyky"*, 478-480.
7. DSTU IEC 61850-3. Komunikatsiini merezhi ta systemy na pidstantsiiakh. Chastyna 3. Zahalni tekhnichni vymohy (IES 61850-3:2002, IDT). (2013). 16.
8. Qian L., Leren W., Shuhan Z., Yuejin T., Yan X. (2012). Method to Determine the Ratio Error of DC High-Voltage Dividers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, №. 4, 1072-1078.
9. Haiming S., Bo L., Feipeng L., Dongxue D., Zhi L. (2014). The voltage coefficient determination of high-voltage capacitive divider by serial summation of voltage transformers. *Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014)*, 772-773.
10. Feipeng L., Huang hui Zhang, Haiming S., Bo L. (2014). Research on voltage variation of DC high-voltage resistive divider by Measuring Leakage Current. *Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014)*, 384-385.
11. Merev A. A., Hallstrom J. K. (2015). Reference System for Measuring High-DC Voltage Based on Voltage References. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, №. 1, 184-189.
12. Yi L., Ediriweera M. K., Emms F. S., Lohrasby A. (2011). Development of Precision DC High-Voltage Dividers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, №. 7, 2211-2216
13. Prochazka R., Hlavacek J., Draxler K., Styblikova R. (2013). Precise 10 and 20 kV DC/AC resistive divider. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 774-777.

УДК 621.391.823

В.А. Бржезицький, д-р техн. наук, проф., **ORCID** 0000-0002-9768-7544

И.Н. Маслюченко, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0001-6073-9649

М.Ю. Лапоша, аспирант, **ORCID** 0000-0003-0909-7876

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
ПРЕДЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НЕИДЕНТИЧНОСТИ R-, C-ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО
ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЕГО ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

В статье рассмотрено влияние неидентичности резистивных и емкостных элементов высоковольтного плеча смешанного делителя напряжения на его частотные характеристики. Получены аналитические выражения для исследования влияния неидентичности элементов высоковольтного делителя напряжения при предельном дискретном распределении этих элементов. Показано, что при данном дискретном распределении резистивных и емкостных элементов влияние их неидентичности на амплитуды колебаний амплитудно-частотной характеристики и фазо-частотной характеристики делителя напряжения увеличивается более чем в пять раз по отношению к «треугольному» распределению параметров элементов при равных значениях их максимальных отклонений (от средних значений). Полученные в статье результаты рекомендуется использовать для оценки «сверху» влияния неидентичности резистивных и емкостных элементов высоковольтного делителя напряжения на его частотные характеристики.

Ключевые слова: высоковольтный делитель напряжения, неидентичность элементов, амплитудно-частотная характеристика, фазо-частотная характеристика

Надійшла 12.03.2017

Received 12.03.2017

УДК 621.3.011.74.005

В.В. Михайленко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-0973-4612

І. В. Майкович, студентка

Т.А. Наухацька, студентка

Р.О. Рокицький, студент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ДВАДЦЯТИЗОННИМ РЕГЮЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

У цій статті проведено аналіз електромагнітних процесів у електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах. Стаття присвячена розвитку методу багатопараметричних функцій шляхом розробки нових математичних моделей та визначення функцій і алгоритмічних рівнянь для аналізу за підсистемними складовими електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і ланками з синусоїдальними, постійними та імпульсними напругами. Напівпровідникові комутатори можуть виконувати високочастотне зміння структури електричних кіл і широтно-імпульсну модуляцію фазних і лінійних напруг трифазної мережі електроживлення, виконуючи регулювання вихідних напруг напівпровідникових перетворювачів параметрів електричної енергії.

Ключові слова: електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм, багатопараметричні модулюючі функції, напівпровідникові комутатори, моделювання.

Успіхи у перетворенні електричної енергії, а також розвиток напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою перемикання вентилів значно більшою від частоти змінної напруги промислової мережі. В тих випадках, коли за вимогами навантаження необхідно забезпечити його гальванічну розв'язку з енергетичною мережею при багатозонному регулюванні вихідної напруги, в якості проміжних доцільно використовувати структури перетворювачів частоти з однократною модуляцією (ПЧ з ОМ). У [1–3] показана доцільність використання структур ПЧ з ОМ в діагностичних комплексах електромеханічних систем для побудови вторинних джерел живлення з різними видами вихідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз використання тієї ж структури в якості ланки високої частоти перетворювачів трифазної напруги в постійну напругу при підключенні силових модуляторів (СМ) до лінійних проводів енергетичної мережі і широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при двадцятичотиризонному керуванні. Таке з'єднання дозволяє покращити форму вхідних струмів перетворювача за рахунок відсутності в них гармонік, які кратні трьом.

Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: $СМ_{AB}$, $СМ_{BC}$, $СМ_{CA}$ – силові модулятори відповідних лінійних напруг, сукупність яких представляє собою ланку високої частоти перетворювача, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження. Кожний з СМ складається з N інверторів випрямленої напруги (ІВН), які включені енергетичними входами паралельно і навантажені на узгоджувальні трансформатори (ТВ), з'єднані вторинними обмотками послідовно.

Метою роботи є використання методу багатопараметричних функцій з застосуванням пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами.

При складанні математичної моделі перетворювача з комп'ютерною орієнтацією її застосування використаємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [2], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична, її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди ІВН представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної не мають втрат, а навантаження перетворювача має еквівалентний активно-індуктивний характер.

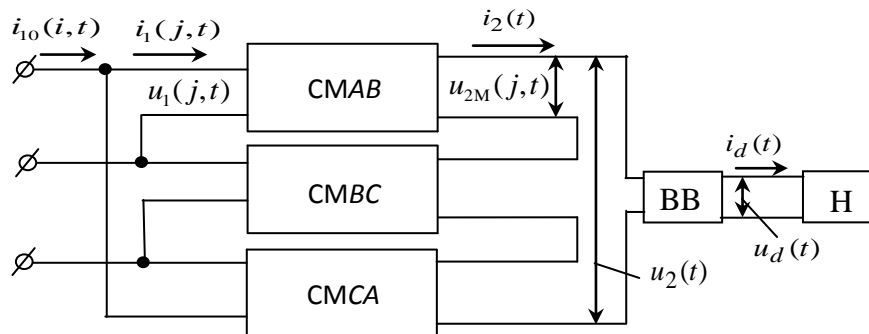


Рисунок 1 – Структурна схема перетворювача

Така структура дозволяє реалізувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії мережі, при якому в СМ здійснюється розгалужена модуляція миттєвих значень лінійних напруг трифазної енергетичної мережі, частоти ω_1 , відповідними еквівалентними модулюючими впливами $\psi(\alpha_p, t)$, частоти ω_2 . В результаті такої операції на виході кожного з ІВН формується промодульована напруга

$$u_{2M}(p, j, t) = \frac{1}{k_T} u_1(j, t) \phi(j, t) \psi(\alpha_p, t), \quad (1)$$

де: $j = 1, 2, 3$ – номери лінійних напруг енергетичної мережі, відповідно AB, BC, CA ; k_T – коефіцієнти трансформації узгоджувального трансформатора; $p = 1, 2, 3, \dots, n$ – номер зони регулювання вихідної напруги, збігається з номером інвертора СМ; $\phi(j, t)$ – функції прямокутних синусів, які співпадають за положенням в часовій області з відповідними лінійними напругами мережі:

$$\phi(j, t) = \text{sign} \left\{ \sin \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right) \right\}; \quad (2)$$

де: $u_1(j, t)$ – миттєві значення лінійних напруг енергетичної мережі:

$$u_1(j, t) = U_{1m} \sin \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right); \quad (3)$$

U_{1m} – амплітудне значення фазної напруги.

Еквівалентні модулюючі впливи подамо виразом

$$\psi(\alpha_p, t) = \frac{1}{2} \sum_2 \text{sign}(\sin(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \phi)) , \quad (4)$$

де $\alpha_p(t)$ – кути управління, за рахунок зміни яких забезпечується ШПР вихідної напруги перетворювача; ϕ – початкова фаза еквівалентних модулюючих впливів.

При багатозонному регулюванні вихідної напруги перетворювача забезпечується почергово зміна кутів управління в діапазоні від 0 до 90° . Умови зміни кутів управління у окремих зонах подамо у вигляді: $\alpha_p(t) = 0$, якщо $t < \frac{(p-1)T}{N=20}$; $\alpha_p(t) = 180^\circ$, якщо $t > \frac{pT}{N=20}$, а інакше

$\alpha_p(t) = f_\mu(p, 20, t)$, де $f_\mu(p, 20, t)$ – функція, яка задає закон зміни $\alpha_p(t)$, яка залежить від номера зони p і їх кількості

Вихідну напругу $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача, згідно з його структурною організацією і з виразом (1), запишемо сумою

$$u_2(t) = \sum_{p=1}^{N=20} \sum_{j=1}^3 \frac{1}{k_o} u_1(j, t) \phi(j, t) \psi(\alpha_p, t) , \quad (5)$$

а вихідну напругу перетворювача $u_d(t)$ як випрямлену напругу (6) подамо виразом

$$u_d(t) = \sum_{p=1}^{N=20} \sum_{j=1}^3 \frac{1}{k_\delta} u_1(j,t) \phi(j,t) \psi(\alpha_p, t) v(t), \quad (6)$$

де: $v(t)$ – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням вихідної напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача

$$v(t) = \text{sign}(u_2(t)) . \quad (7)$$

Часові діаграми вихідних напруг ІВН $u_{2M}(p, j, t)$, ланки високої частоти $u_2(t)$ і перетворювача $u_d(t)$, побудовані за (5) і (6) при зміні величини кута управління α_p за лінійним законом у координатах від часу t , наведено на рис. 3.

Для більш детального аналізу вихідної напруги перетворювача в (5) позначимо $u_1(j,t)\phi(j,t) = |u_1(j,t)|$ і, враховуючи (3) та (4), а також те, що в (6) $\psi(\alpha_p, t)v(t) = |\psi(\alpha_p, t)|$, алгоритмічне рівняння перепишемо у вигляді

$$u_d(t) = \frac{1}{2k_T} \sum_{p=1}^{N=20} \left(\sum_{j=1}^3 \left| U_{1m} \sin(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right| \left| \sum_2 \sin n(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \varphi) \right| \right). \quad (8)$$

Струм навантаження знайдемо, як реакцію одноконтурного RL -кола на дію напруги (6). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо у вигляді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \quad (9)$$

де: y_0 визначається з початкових умов; R і L – відповідно активний опір і індуктивність навантаження.

Розв'язок (9) відносно струму навантаження визначимо числовим методом, у вигляді матриці

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \quad (10)$$

де: y – вектор початкових умов; $0, k$ – часовий інтервал рішення; s – кількість точок на часовому інтервалі рішення; D – вектор функція диференціальних рівнянь.

Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти для двадцятизонного регулювання представлені на рис. 2.

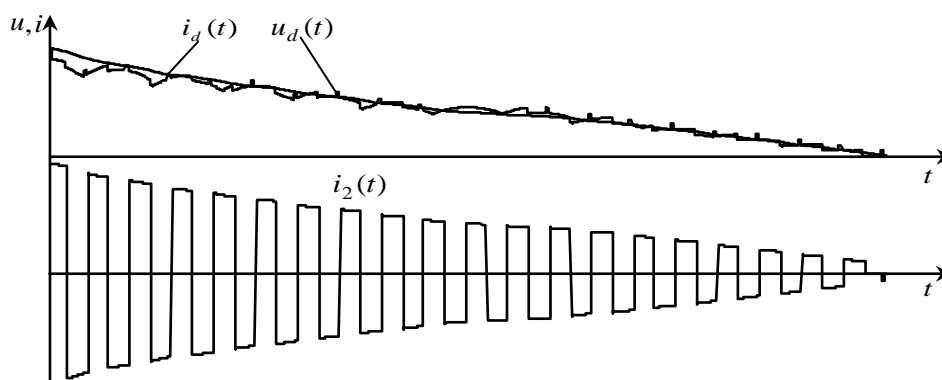


Рисунок 2 – Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти

Враховуючи ту обставину, що на інтервалах нульових пауз (7) струм навантаження підтримується в контурі навантаження і діодів ВВ за рахунок енергії, яка запасається в індуктивності за попередні цикли роботи перетворювача і з енергетичної мережі не споживається, для визначення вихідного струму $i_2(t)$ ланки високої частоти достатньо (10) перемножити на функцію (7), що має одиничну амплітуду і співпадає за часом з (6). Тоді

$$i_2(t) = i_d(t)v(t) \quad (11)$$

Для визначення вхідних струмів інверторів кожної p -ї зони регулювання врахуємо, що $i_2(t)$ протікає в загальному контурі всіх СМ, утвореному послідовно з'єднаними вторинними обмотками узгоджувальних трансформаторів і прийемо до уваги алгоритмічне рівняння (6) і те, що (2), (4) і (7) є функціями одичної амплітуди.

При цьому у загальному вигляді

$$i_1(n, j, t) = \frac{i_2(t)\psi(\alpha_p, t)\phi(j, t)}{k_T} \quad (12)$$

Для визначення вхідних СМ у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги підсумуємо вхідні струми відповідних ІВН. Враховуючи (12), загальний вираз для вхідних струмів СМ подамо у вигляді

$$i_1(j, t) = \sum_{p=1}^{N=20} i_1(p, j, t), \quad (13)$$

де: $i_1(p, j, t)$ – вхідні струми ІВН.

Часові діаграми вхідних струмів відповідних СМ, побудовані за (13), представлені на рис. 3.

Вхідні струми перетворювача знаходимо з співвідношень

$$\begin{aligned} i_{10}(1, t) &= i_1(1, t) - i_1(3, t) \\ i_{10}(2, t) &= i_1(2, t) - i_1(1, t) \\ i_{10}(3, t) &= i_1(3, t) - i_1(2, t) \end{aligned} \quad (14)$$

Часові діаграми вхідних струмів i -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг, побудовані за (14), представлені на рис. 4.



Рисунок 3 – Часові діаграми вхідних струмів відповідних СМ

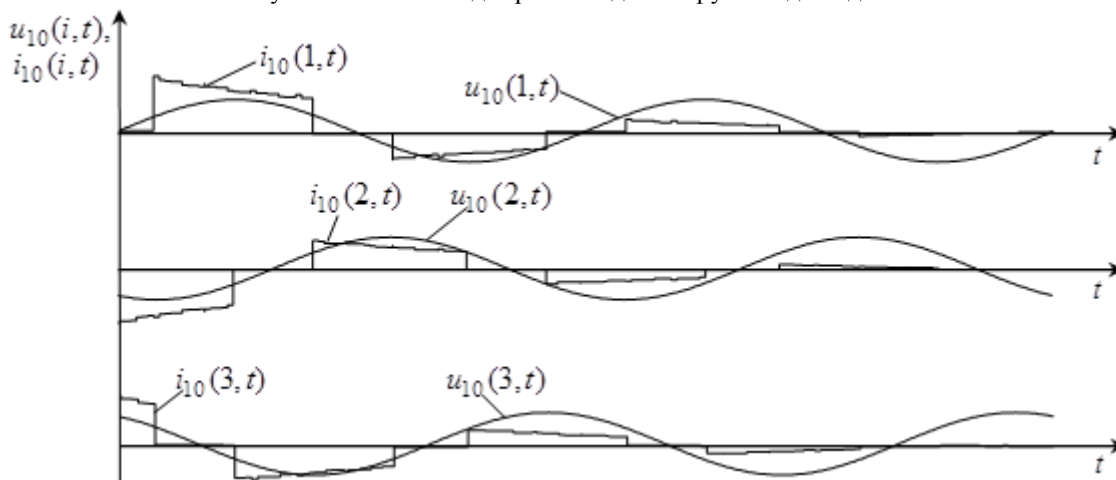


Рисунок 4-Часові діаграми вхідних струмів та напруг i -х фаз енергетичної мережі

Таким чином, наведені результати досліджень показують ефективність подання математичної моделі перетворювача відносно напруги навантаження, струму навантаження і струмів, що споживаються з вхідної мережі узагальнюючими функціями багатопараметричного виду. Узагальнюючі функції багатопараметричного виду ефективні й для інших перетворювачів модуляційного типу.

Дослідження показують ефективність використання багатопараметричних модулюючих функцій для моделювання і розрахунку електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах напівпровідникових перетворювачів з багатозонним високочастотним широтноімпульсним регулюванням їх вихідної напруги при живленні RL-навантаження.

Висновки

Підтверджено доцільність використання програмного пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів та оптимізації параметрів напівпровідникових перетворювачів. Такий підхід дозволяє зменшити нестабільність режимів у технологічному навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.

Список використаної літератури.

1. Макаренко М.П. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачах з багатозонним регулюванням вихідної напруги функціями багатопараметричного виду / М.П. Макаренко, В.В. Михайленко // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність - Тематичний випуск - 2002. - Ч.1. - С.19-22.
2. Макаренко М.П. Напівпровідникові перетворювачі електромеханічних комплексів з покращеною електромагнітною сумісністю / М.П. Макаренко, В.В. Михайленко, А.А. Щерба, М.М. Юрченко // Вестник НТУ "Харьковский политехнический институт". "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – 2003.– Вып. 13. – Т. 2 – С. 213–214.
3. Михайленко В.В. Математична модель напівпровідникового перетворювача трифазної напруги у постійну з трizonним регулюванням вихідної напруги / В.В. Михайленко, В.В. Андрійчук, Я.В. Романчук // Доповіді за матер. МНТК "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – Київ: Політехніка. – 2011. – С. 417–418.

V. Mihaylenko, PhD in Technical Sciences, assistant professor, **ORCID** 0000-0002-0973-4612

I. Maykovych, student,

T. Nauhatska, student,

R. Rokytskiy, student,

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

ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN CONVERTER WITH TWENTY ZONE REGULATION OUTPUT VOLTAGE

Analysis of the electromagnetic processes is organized beside this article in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis electro-magnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. The broughted graphs, which reflect the electromagnetic processes in electric circuit. Method much parametric functions was used when performing calculation. The mathematical model of the converter is created for twenty zoned regulations of the output voltage. Article is devoted to the development of a method of multi-parametric modulating functions by means of working out of new mathematical models and definition of functions and the algorithmic equations for the analysis on sub-system components of electromagnetic processes in electric circuits of variable structure with sinusoidal, direct and pulsing voltage. Introduction of functions with discrete parameters in the algorithmic equations for analysis of processes in circuits with semiconductor commutators simplifies modeling on subsystem components. The mathematical model of steady-state processes and transients in electric circuits of semiconductor converters of modulation type with multi-channel zonal use of phase and line voltages of a three-phase network of power supplies is developed. The mathematical model of electric circuits of thyristor shapers of electro-discharge pulses for the analysis and the matching of capacitors charging modes with decrease several times of electric resistance of technological load is also created. The obtained results have a great value for development theoretical electrical engineering in a direction of simplification of calculations of electromagnetic processes in electric circuits with semi-conductor converters of the electric power. The Electromagnetic processes in electric circuit under width-pulse regulation possible to analyse with use the

algorithmic equations multivariable function, which argument are a system parameters semiconductor commutator, signal of control, phases to network of the power supply and time. Introduction multivariable function with discrete parameter in algorithmic equations of the analysis formed and connecting processes in electric circuit of the variable structure allows to reflect change of this structure under system components, simplifying modeling and analysis of such processes to account of the generalization of the got equations. Except specified correlations and diagrams designed model allows to analyse forms of the output voltages and current of the separate power modules.

Key words: electromagnetic processes, output voltage and current, multi parametric modulating functions, semi-conductor commutators, modeling.

References

- [1] Makarenko M.P. The Analysis of the electromagnetic processes in converter with much zoned regulations of the output voltage function multivariable type/ M.P. Makarenko, V.V. Mihaylenko // *Technicheskaia elektrodinamika. Silova electronica i energoefektivnist – Thematic vypusk. – 2002. – Part 1. – P. 19-22 (Ukr.)*
- [2] Makarenko M.P. Semiconductor converters electromechanic complex with perfected by electric magnetic joining / M.P. Makarenko, V.V. Mihaylenko, A.A. Scherba, N.N. Yurchenko // *Vesnik NTU "Kharkovskiy politehnic institute". "Problemes avtomatic electroprivoda. Theory and practice". – 2003.– Issue 13. – Part 2 – P. 213–214 (Ukr.)*
- [3] Mihaylenko V.V. Mathematical model of the semiconductor converter of the three-phase voltage in constant with three zoned regulations of the output voltage / V.V. Mihaylenko, V.V. Andriychuk, Y.V. Romanchuk // *Dopovidi za materialamy MNTK "Suchasni prolems electroenergetyki and avtomatic". – Kyjv: Polytechnica. – 2011. – P. 417–418 (Ukr.)*

УДК 621.3.011.74.005

В.В. Михайленко, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0002-0973-4612

И. В. Майкович, студентка

Т.А. Наухацька, студентка

Р.О. Рокицький, студент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ДВАДЦАТИЗОННЫМ РЕГУЛИВАНИЕМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В этой статье проведен анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создана математическая модель для анализа электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Приведены графики, которые отражают электромагнитные процессы в электрических цепях. При выполнении расчетов использовался метод многопараметрических функций. Математическая модель преобразователя создана для двадцатизонного регулирования выходного напряжения. Статья посвящена развитию метода многопараметрических модулирующих функций путем разработки новых математических моделей и определения функций и алгоритмических уравнений для анализа по подсистемным составляющим электромагнитных процессов в разветвленных электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами и звеньями с синусоидальными, постоянными и импульсными напряжениями. Полупроводниковые коммутаторы могут осуществлять высокочастотное изменение структуры электрических цепей и широтно-импульсную модуляцию фазных и линейных напряжений трехфазной сети электропитания, реализуя регулирование выходных напряжений полупроводниковых преобразователей параметров электрической энергии.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, выходные напряжение и ток, структура, многопараметрические модулирующие функции, полупроводниковые коммутаторы, моделирование.

Надійшла 01.03.2017

Received 01.03.2017

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ХИММОТОЛОГИИ

Данная статья посвящена рассмотрению целей и задач науки химмотологии. В работе представлено современное трактование науки, ее роль для развития техники и общества в целом. Показано, что с развитием ассортимента современных топливо-смазочных материалов, разработкой и популяризацией альтернативных топлив, рассмотрение проблем химмотологии невозможно вне системного подхода. Помимо теоретической составляющей науки химмотологии, неотъемлемой является и прикладная составляющая, задачей которой является обеспечение энергетической и экологической безопасности экономики страны, рациональное применение традиционных и альтернативных топливо-смазочных материалов при эксплуатации современной и перспективной техники. В статье акцентируется внимание на том, что в последние годы одной из важнейших является экологическая сущность химмотологии, которая состоит в максимально возможной минимизации негативного влияния топливо-смазочных материалов и технических жидкостей на экосистемы. Кроме того становятся актуальными процессы регенерации, восстановления качества, утилизации и рециклинга топливо-смазочных материалов. В заключение данной работы показано, что фундаментальность науки химмотологии состоит в проявлении системных методологических свойств при решении современных инженерных задач совершенствования техники и развития источников энергии для двигателей транспортных средств.

Ключевые слова: химмотология, топливо-смазочные материалы, техника, качество, эксплуатация, системный подход.

Рациональное использование топливно-смазочных материалов, энергоэффективность, экологичность входят в число важнейших проблем современности. Их решение в значительной мере определяет стабильное развитие мировой экономики и сохранение комфортных условий человечества.

Наукой, которая стала ответственной за обеспечение целостности в решении множества задач этих проблем, является химмотология.

Энциклопедическое понятие науки определяет ее как сферу человеческой деятельности, функцией которой является выработка и теоретическая систематизация объективных знаний о действительности [1–3]. Непосредственные цели науки – описание, объяснение и предсказание процессов и явлений действительности, которые составляют предмет ее изучения на основе открытых законов, т.е. теоретическое отображение действительности. Все эти признаки имеет химмотология.

Современная дефиниция науки химмотологии трактуется так. Это – наука о технологических процессах, свойствах, качестве и методологии рационального использования топлив, масел, смазок и технических жидкостей при эксплуатации техники [2, 4–6]. При этом необходимо рассматривать как нефтяные, так и альтернативные топливно-смазочные материалы.

Знание техники подразумевает не только знание конструкции, кинематических, динамических, температурных характеристик, но также и физико-химических свойств конструкционных материалов, необходимых для анализа и прогнозирования физико-химических процессов во время применения конкретного ТСМ.

Например, самолёт – это огромное количество металлических и композиционных деталей, синхронно летящих на скорости 900 км/час (0,85 от скорости звука, это типовая скорость Boeing 787 Dreamliner) на высоте 10 км. Пара-тройка миллионов деталей изготавливается и собирается в одно изделие – и самолёт летит, обеспечивая комфорт пассажирам и прибыль владельцам (рис. 1).

Обеспечить надёжный и экономичный совместный полёт этих деталей, увязав самые разные требования (грузоподъёмность, расход топлива, дальность полёта, шум при взлёте и посадке, требования к длине разбега и посадки, необходимость лёгкого обслуживания на земле, отсутствие обледенения, безопасность людей на борту и т.д. и т.п.) возможно лишь при помощи системно-инженерного мышления, учитывая требования самых разных специалистов, представляющих самые разные профессиональные и общественные группы [5, 7, 8].

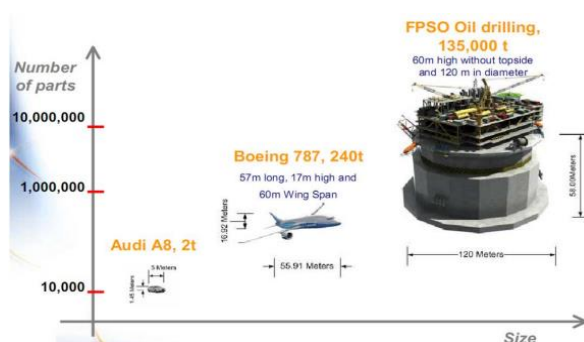


Рисунок 1 – Количество деталей и вес некоторых инженерных сооружений

Обобщенную функцию полезности ТСМ как социально-полезных продуктов (в отличие от обобщенной функции транспортных средств) невозможно описать соответствующей конструкторской документацией и чертежами [9, 10]. Именно это принципиальное отличие ТСМ от продукции машиностроения объективно обусловила появление химмотологии.

Как известно из научных трудов классиков химмотологии [1–4, 8–11], в любом виде техники и оборудования, где применяются топлива, смазочные материалы и технические жидкости (ТЖ), объективно существует универсальная четырехзвенная химмотологическая система (рис. 2) [12–15]. Эта система учитывает взаимосвязь между качеством ТСМ, надежностью техники и условиями ее эксплуатации. Это прослеживается и на рис. 3, где представлена усовершенствованная химмотологическая система.

Изначально химмотология характеризуется системностью. Химмотология, как, например, системотехника или системная инженерия, обладает таким методологическим приемом в науке и технике, который охватывает проектирование, создание, испытание и эксплуатацию сложных систем [8, 10]. В определенной степени это прикладное воплощение теории систем, в котором термин «система» используется особым образом, подразумевая образ мышления для объяснения когерентных связей между элементами системы, синергизма и эмерджентности [16–18]. Здесь «система» выражает не только сущность, но и отношение к сущности объекта, подчеркивает класс свойств, интересующие точки зрения, – отсюда многогранность описаний и огромное количество возможных способов декомпозиции системы и выделение подсистем.

Эти мысли можно проследить на рисунке 3, который интегрированно иллюстрирует междисциплинарность химмотологии, саму химмотологическую систему, ее иерархичность, химмотологические когерентные связи, структуру, сущность, синергизм и эмерджентность.

Здесь ярко видно как взаимодействие элементов и когерентных процессов на примере авиационного двигателя приводят к синергетическому и эмерджентному эффектам – экологичности, эффективности, надежности и долговечности техники.

В настоящее время рассмотрение проблем химмотологии вне системного подхода к познанию не возможно. Это качественно более высокий, нежели просто предметный способ познания [18, 19].

(Синергизм – суммирующий эффект взаимодействия двух или более факторов, характеризующийся тем, что их действие существенно превосходит эффект каждого отдельного компонента в виде их простой суммы) [8, 13].

«Эмерджентность – качество, свойство системы, которое не присуще её элементам в отдельности, а возникают благодаря объединению этих элементов в единую, целостную систему».

С философской точки зрения можно смело утверждать, что консолидирующую функцию системной интеграционной коммуникации ученых и практиков машиностроительной, химической, нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслей экономики вместе с эксплуатантами техники для решения эволюционных задач научно-технического прогресса совершает прикладная наука химмотология [19–21]. Например, нефтепереработчики производят бензин, дизельное и другие виды топлива, для дальнейшего применения в двигателях. Знать ТСМ и ТЖ означает иметь четкое понимание взаимосвязи показателей, характеризующих качество с физико-химическими и энергетическими процессами, которые протекают во время их использования в конкретных условиях, а также взаимосвязь с их химическим и групповым составом.

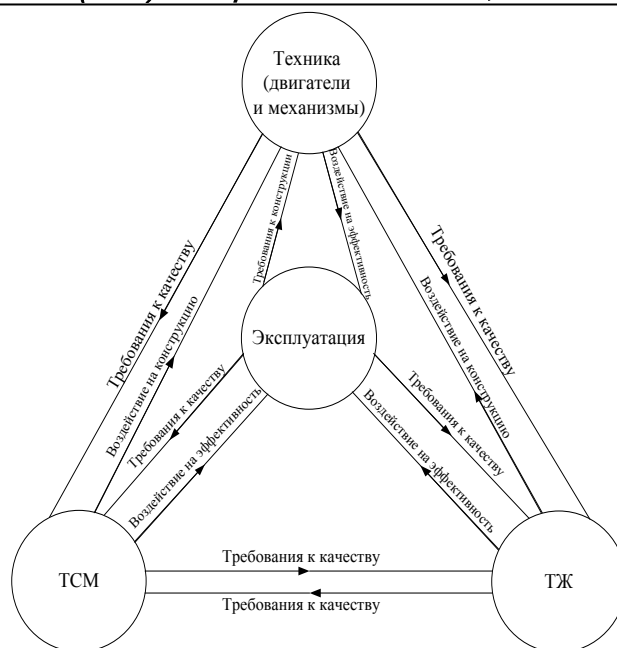


Рисунок 2 – Усовершенствованная четырехзвенная химмотологическая система

Нехватка такого анализа и прогнозирования делает невозможным достижение цели, технического и социального эффектов. Это еще одно яркое свидетельство явления синергизма в функционировании химмотологической системы. Особую роль в химмотологии играет контроль качества ТСМ и ТЖ на пути от их производителя до потребителя [20–22]. Как мы видим из рис. 3 качество эксплуатационных материалов является входящим параметром в саму систему.

Практикой доказано, что применение ТСМ и ТЖ с завышенными показателями качества (уровнем качества) приводит к превышению затрат в сфере их производства, а с заниженными – к росту затрат в машиностроении и при эксплуатации техники [22–24].

Как известно, рассматривать любую научную проблему невозможно без стройной мировоззренческой системы. Мировоззрение, которое выбирает конкретная цивилизация, определяет весь характер действий социума и его влияние на окружающую природную среду. Исходя из этого, экологическая сущность химмотологии состоит в максимально возможной минимизации негативного влияния ТСМ и ТЖ на экосистемы [20, 24].

О роли химмотологии как прикладной науки свидетельствует важность решаемых ею задач: обеспечение энергетической и экологической безопасности экономики страны, рациональное применение традиционных и альтернативных ТСМ и ТЖ при эксплуатации современной и перспективной техники [25, 26].

Характерным для эксплуатации техники является также ухудшение качества ТСМ и ТЖ в результате их испарения, накопления продуктов окисления, выпадения в осадок или вымывания некоторых присадок, смешивания ТСМ и ТЖ разных марок и др. (рис. 3) [26, 27]. Тут становятся актуальными процессы регенерации, восстановления качества, утилизации и рециклинга.

Классика системного подхода свидетельствует, что для решения любой проблемы характерны следующие элементы:

- 1) кто-нибудь (или некоторая группа) должен быть поставлен перед проблемой, т.е. необходимо существование принимающего решения;
- 2) цель, желание принимающего решения, направленные на решение проблемной ситуации, т.е. его цель и основания для постановки проблемы и достижения этой цели
- 3) принимающий решения должен иметь выбор среди альтернативных действий, которые приводят к достижению цели.

Эти аргументы позволяют нам утверждать, что химмотологическая система «двигатель – топливо – смазочные материалы – технические жидкости» является управленческой задачей, в которой применяются и прескриптивные, и дескриптивные методы. Тут прослеживается когерентность химмотологии с кибернетикой (что изображено связями в верхней части (рис. 3)). На каждом этапе создания двигателя (правая часть рис. 3), его эксплуатации и применении ТСМ также свидетельствует о необходимости принятия решений (левая часть рис. 3), что в итоге воплощается в синергетическом результате – обеспечение эффективной, экологичной, надежной и экономичной эксплуатации техники [27–29].

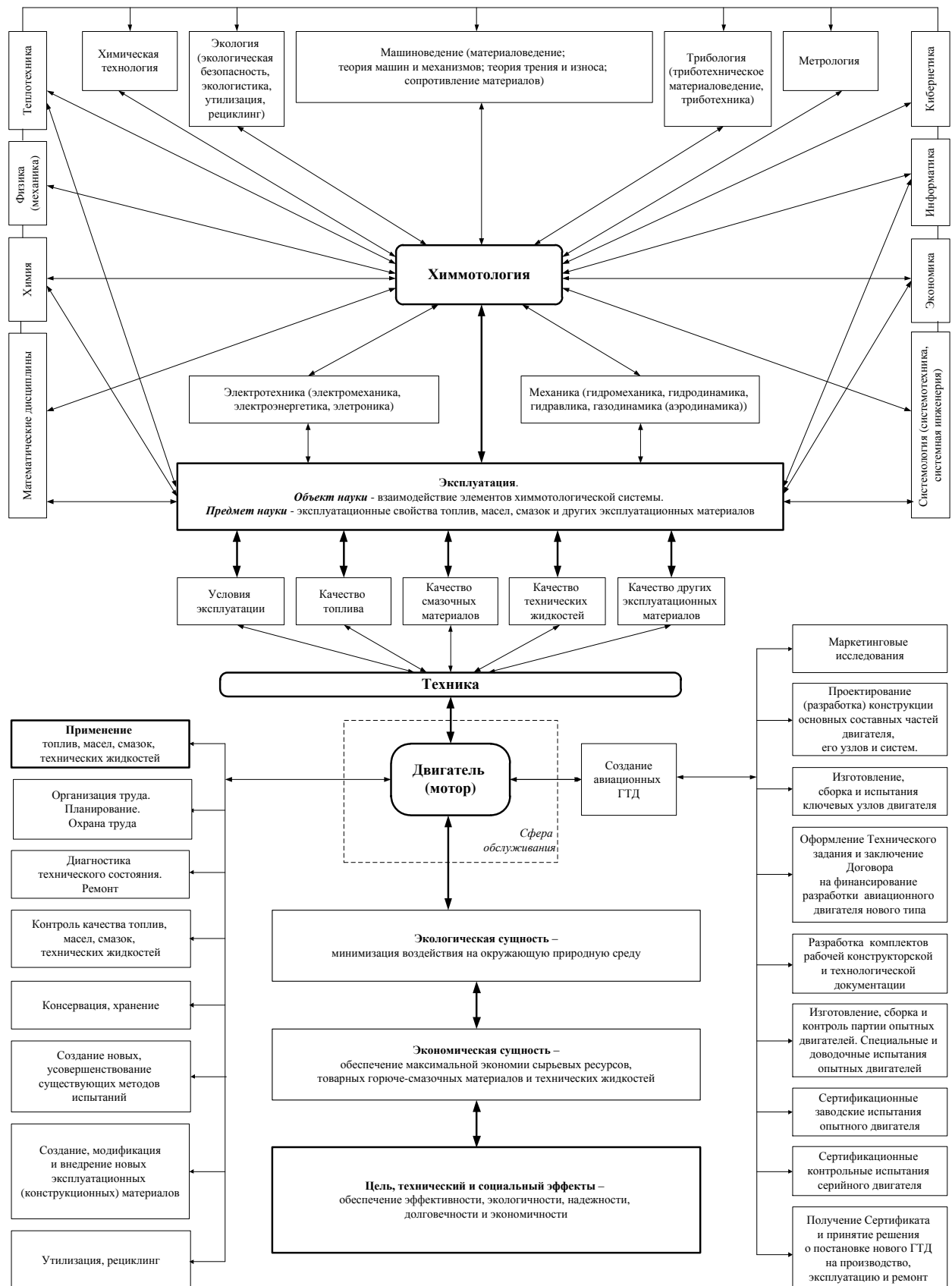


Рисунок. 3 - Феноменологическая схема (модель) химмотологии

Следовательно, фундаментальность науки химмотологии состоит в проявлении системных методологических свойств при решении современных инженерных задач совершенствования техники и развития источников энергии для двигателей транспортных средств одновременно. Применяя химмотологию и действуя химмотологическими знаниями можно достичь значительных результатов научно-технического прогресса в технике [28, 30]. Концепция химмотологии состоит в системной интеграции знаний машиностроительной, химической, нефтеперерабатывающей и нефтехимической сфер научно-практической деятельности для достижения синергетических результатов в обеспечении надежности, безопасности, долговечности и экономичности техники.

Список использованной литературы

1. Теоретические основы химмотологии / Под ред. А. А. Браткова. – М.: Химия, 1985. – 320 с.
2. Гуреев А. А., Фукс И. Г., Лашхи В. Л. Химмотология. – М.: Химия, 1987. – 304 с.
3. Большаков Г. Ф. Физико-химические основы применения топлив и масел. – Новосибирск: Наука, 1987. – 269 с.
4. Инженерные основы авиационной химмотологии / Л. С. Яновский, Н. Ф. Дубовкин, Ф. М. Галимов и др. – Казань: Изд. Казанского университета, 2005. – 714 с.
5. Аксёнов А., Бойченко С., Терёхин В. Химмотологическая научно-педагогическая школа в системе информационного обеспечения учебного процесса // Нефть и газ. – 2009. – № 1. – С. 74–79.
6. Аксёнов О., Бойченко С. Місце та роль хімотології як науки в комплексній системі знань // Нефть и газ. – 2008. – № 7. – С. 90–92.
7. Середа В. В., Волгин С. Н. 40 лет – молодость и зрелость науки // Химия и технология топлив и масел. – 2004. – № 5. – С. 3–6.
8. Бойченко С., Новікова В., Черняк Л., Луганова Т. Хімотологія: порівняльний аналіз деяких термінів // Проблеми української термінології: Зб. наук. праць. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2008. – С. 102–104.
9. Братков А. А. Химмотология и научно-технический прогресс // Химия и технология топлив и масел. – 2004. – № 5. – С. 7–10.
10. Гришин Н. Н., Лашхи В. Л., Егин А. И. О совершенствовании квалификационных испытаний топлив и смазочных материалов // Химия и технология топлив и масел. – 2004. – № 5. – С. 16–17.
12. Лашхи В. Л., Гришин Н. Н. Новое в теории химмотологии смазочных материалов // Химия и технология топлив и масел. – 2004. – № 5. – С. 41–45.
13. Радченко Е. Д., Шехтер Ю. Н. Роль химмотологии и триботехники в создании современных смазочных материалов и износа металлоизделий // Химия и технология топлив и масел. – 1987. – № 4. – С. 2–5.
14. Горючие, смазочные материалы: Энциклопедический толковый словарь-справочник / Под ред. В. М. Школьников. – М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» Международной Академии Информатизации», 2007. – 736 с.
15. Фукс И. Г., Спиркин В. Г., Шабалина Т. Н. Основы химмотологии. Химмотология в нефтегазовом деле. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. – 280 с.
16. Данилов А. М. Введение в химмотологию. – М.: «Техника». ООО «ТУМА ГРУПП» – 2003. – 464 с.
17. Химмотология в гражданской авиации: Справочник / В. А. Пискунов, В. Н. Зрелов, В. Т. Василенко и др. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.
18. Вступ до хімотології палив та олів: Навчальний посібник у двох частинах / Бойченко С. В., Спиркін В. Г. – Одеса: «Астропринт», 2009. – Ч. 1. – 236 с.
19. Бойченко С. В. Хімотологічна модель системи нафтопродукто-забезпечення // Екотехнології и ресурсосбережение. – 2003. – № 2. – С. 31–35.
20. O. Zaporozhets, S. Boychenko, V. Tokarev, G. Franchuk. Investigation and research of environmental and chemmotological problems of civil aviation in the national aviation university // Proceedings Of the third world congress «Aviation in the XXI-st century». – Kyiv, September 22–24.2008. – P. 4.1–4.4.
21. Серегин Е. П. Современное состояние развития теории химмотологии // Вісник НАУ. – 2009. – № 1. – С. 89–94.
22. Волгин С. Н., Лашхи В. Л., Гришин Н. Н. Главная задача химмотологии // Вісник НАУ. – 2009. – № 1. – С. 104–107.
23. Середа В. В., Лашхи В. Л., Гришин Н. Н. Перспективы развития химмотологии. К 100-летию со дня рождения К. К. Папок // Мир нефтепродуктов. – 2008. – № 6. – С. 4–6.
24. Спиркин В. Г., Евдокимов А. Ю., Фукс И. Г., К. К. Папок – первый эколог в химмотологии // Химия и технология топлив и масел. – № 4. – 2004. – С. 2.

25. Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Облащикова И.Р. Экологическая безопасность применения топлив и смазочных материалов на базе растительного сырья // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – № 3. – 2005. – С. 28–30.

26. Евдокимов А. Ю. Единство естественнонаучного и гуманитарного подходов в решении проблем экологии (на примере химмотологии смазочных материалов) // Наука и технологии в промышленности. – №4. – 2011. – С. 99–104.

27. Аксенов А. Ф., Серегин Е. П., Яновский Л. С., Бойченко С. В. Современная парадигма и перспективы развития химмотологии // Химия и технология топлив и масел. – № 4 (578). – 2013. – С. 13–20.

28. Boichenko S., Iakovlieva A., Vovk O., Shkilniuk I., Lejda K.. Traditional and alternative jet fuels: problems of quality standardization // Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology. – 2013. – Vol. 4. – Iss. 3. – 5 p.

29. Бойченко С. В., Аксенов А. Ф. Определяющая роль химмотологии // Мир нефтепродуктов. – 2014. – № 6. – С. 55–56.

30. Boichenko S. Innovative chemmotological thought as an integrated system of knowledge // Chemistry & Chemical Technology. – 2014. – Vol. 8. – No. 3. – P. 349–358.

S. Boychenko , Professor, Doctor of Science (Engineering) **ORCID** 0000-0002-1196-3852
National Aviation University,

PHENOMENOLOGICAL CONCEPT OF CHEMMOTOLOGY

This article is devoted to consideration of goals and objectives of Chemmotology science. The paper presents a modern interpretation of science, its role in the development of technology and society. It is shown that with the development of the range of modern fuel and lubricants, the development and promotion of alternative fuels, consideration of Chemmotology problems is impossible without systematic approach. In addition to the theoretical part of Chemmotology science, it is an integral component of the application, and whose task is to ensure energy and environmental security of the country's economy, rational use of traditional and alternative fuels and lubricants in the operation of a modern and advanced equipment. The article focuses on the fact that in recent years one of the most important issues is the ecological constituent of Chemmotology, which is aimed on maximally possible minimization of the negative impact of fuel lubricants and technical liquids on ecosystems. Also processes of regeneration, restoration of quality, disposal and recycling of fuel and lubricants become highly relevant. In conclusion, this work shows that the fundamentality of Chemmotology science is the manifestation of systematic methodological characteristics in solving modern engineering problems in technical development and the development of energy sources for motor vehicles.

Keywords: chemmotology, fuels & lubricants, technics, quality, exploitation, system approach

References:

1. Bratkov A.A. Teoreticheskie osnovy himmotologii [Theoretical fundamentals of chemmotology]. Himiya, Moscow, 1985, 320 p. (in Russian)
2. Gureev A.A., Fuks I.G., Lahshy V.L. Himmotologiya [Chemmotology]. Himiya, Moscow, 1987, 304 p. (in Russian)
3. Bolshakov G.F. Fiziko-himicheskie osnovy primeneniya topliv i masel [Physical-chemical fundamentals of fuels and lubricants application]. Nauka, Novosibirsk, 1987, 269 p. (in Russian)
4. Yanovskyi L.S., Dubovkin N.F., Galimov F.M. Ingenierne osnovi aviatsionnoi himmotologii [Engineering fundamentals of aviation chemmotology]. Kazan' university publishing, Kazan', 2005, 714 p. (in Russian)
5. Aksenov A., Boichenko S., Terehin V. Himmotologicheskaya nauchno-pedagogicheskaya shkola v sisteme informatsionnogo obespecheniya uchebnogo protsesa [Chemmotological scientific-pedagogical school in system of information supply of studying process]. Neft' i gaz, 2009, Vol. 1, pp. 74–79. (in Russian)
6. Aksenov A., Boichenko S. Mists eta rol' himmotologii yak nauky v kompleksnii systemi znan'. [Place and role of chemmotology as a science in complex system of knowledge]. Neft' i gaz, 2008, Vol. 7, pp. 90–92. (in Ukrainian)
7. Sereda V., Volgin S. 40 let – molodost' I zrelost' nauki [40 years – youth and maturity of the science] Himiya i tehnologiya topliv i masel, 2004. Vol. 5. pp. 3–6. (in Russian)

8. Boichenko S., Novikova V., Cherniak L., Luganova T. Бойченко С., Новікова В., Черняк Л., Луганова Т. Himmotologiya: porivniialnyi analiz deyakih terminiv [Chemmtology: comparative analysis of some terms] Problemi ukraïnskoi terminologii., 2008, pp. 102–104 (in Ukrainian)
9. Bratkov A. Himmotologiya i nauchno-tehnicheskiy progress [Chemmtology and scientific-technical progress]. Himiya i tehnologiya topliv i masel, 2004. Vol. 5. pp. 7–10. (in Russian)
10. Grishin N., Lahshi V., Egin A. O sovershenstvovanii kvalifikatsionnyh ispytaniy topliv i smazochnih materialov [About development of qualification tests of fuels and lubricants]. Himiya i tehnologiya topliv i masel, 2004. Vol. 5. pp. 16–17. (in Russian).
11. Lahshi V., Grishin N. Novoe v teorii himmotologii smazochnih materialov [New in the theory of chemmtology of lubricants] Himiya i tehnologiya topliv i masel, 2004. Vol. 5. pp. 41–45. (in Russian).
12. Radchenko E., Shehter Yu. Rol' himmotologii i tribotehniki v sozdanii sovremennih smazochnih materialov i iznosa metaloizdelii [The role of chemmtology and tribotechnics in development of modern lubricants and wear of metal details]. Himiya i tehnologiya topliv i masel, 1987. Vol. 4. pp. 2–5. (in Russian).
13. Shkolnikov V. Goruchie smazochnie materialy: enciklopedicheskii tolkovii slovar-spravochnik [Fuels and lubricants: encyclopedic definition dictionary-handbook]. OOO Tehnoinform publishing, Moscow, 2007 – 736 p.
14. Fuks I., Spirkin V., Shabalina T. Osnovy himmotologii. Himmotologiya v neftegazovom dele [Fundamentals of chemmtology. Chemmtology in oil and gas processing]. Neft' i gaz publishing, Moscow, 2004, 280 p. (in Russian)
15. Danilov A. Vvedenie v himmotologiu [Introduction into chemmtology]. Tehnika. OOO TUMA GROUP, Moscow, 2003, 464 p. (in Russian)
16. Piskunov V., Zrelov V., Vasilenko V. Himmotologiya v grazhdanskoï aviatsii: spravochnik [Chemmtology in civil aviation: handbook]. Transport, Moscow, 1983, 248 p. (in Russian)
17. Boichenko S., Spirkin V. Vstup do himmotologii palyv ta olyv [Introduction into chemmtology of fuels and lubricants]. Astroprint, Odessa, 2009, Part 1, 236 p. (in Ukrainian)
18. Boichenko S. Himmotologichna model' systemy naftoproducto-zabezpechennia [Chemmtological model of oil products supply system]. Ekotehnologii i resursosberezheniie, 2003, Vol. 2. pp. 31–35. (in Ukrainian)
19. Zaporozhets O., Boychenko S., Tokarev V., Franchuk G. Investigation and research of environmental and chemmtological problems of civil aviation in the national aviation university. Proceedings Of the third world congress «Aviation in the XXI-st century», Kyiv, 2008, pp. 4.1–4.4.
20. Seregin E. Sovremennoe sostoyanie razvitiya teorii himmotologii [Modern state of development of chemmtology theory]. Visnyk NAU, 2009. Vol. 1. pp. 89–94. (in Russian)
21. Volgin S., Lahshi V., Grishin N. Glavnaiya zadacha himmotologii [The main task of chemmtology]. Visnyk NAU, 2009, Vol. 1, p. 104–107. (in Russian)
22. Sereda V., Lahshi V., Grishin N. Perspektivy razvitiya himmotologii. K 100-letiyu so dnia rozhdeniya K.K. Papok [Perspectives of chemmtology development. 100 years from K.K. Papok birthday. Mir nefteproduktov, 2008, Vol. 6, p. C. 4–6. (in Russian)
23. Spirkin V., Evdokimov A., Fuks I. K.K. Papok – pervii ekolog v himmotologii [K.K. Papok – the first ecologist in Chemmtology]. Himiya i tehnologiya topliv i masel, 2004. Vol. 4. p. 2. (in Russian).
24. Evdokimov A., Fuks I., Oblashchikova I. Ekologicheskaya bezopasnost' primeneniya topliv i smazochnih vaterialov na baze rastitelnogo sir'ya [Environmental safety of the use of fuels and lubricants derived from plant feedstock] Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse, 2005, Vol. 3 – pp. 28–30.
25. Evdokimov A. Edinstvo estestvennonauchnogo i gumanitarnogo podhodov v reshenii problem ekologii (na primere himmotologii) [The unity of natural science and humanitarian science in solving environmental problems (on the example of Chemmtology)]. Nauka I tehnologii v promyshlennosti, 2011, Vol. 4, pp. 99–104.
26. Aksenov A., Seregin E., Yanovskiy L., Boichenko S. Sovremennaya paradigma himmotologii [Modern chemmtological paradigm] Himiya i tehnologiya topliv i masel, 2013, Vol. 4, pp. 13–20. (in Russian)
27. Boichenko S., Vovk O., Shkilniuk I., Lejda K. Traditional and alternative jet fuels: problems of quality standardization. Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology, 2013, Vol. 4, No. 3., pp. 21–26.
28. Boichenko S., Aksenov A. Opredeleyayushchaya rol' himmotologii [Determinant role of chemmtology]. Mir nefteproduktov, 2014, Vol. 6, pp. 55–56. (in Russian)
29. Boichenko S. Innovative chemmtological thought as an integrated system of knowledge. Chemistry & Chemical Technology, 2014, Vol. 8, No. 3, pp. 349–358.

УДК 665.6/7(045)

С.В. Бойченко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-1196-3852

Національний авіаційний університет

ФЕНОМЕНОЛОГІЧНА КОНЦЕПЦІЯ ХІММОТОЛОГІЇ

Дана стаття посвячена розгляду мети та завдань науки хімотології. У роботі представлено сучасне трактування науки, її роль для розвитку техніки і суспільства в цілому. Показано, що з розвитком асортименту сучасних паливо-мастильних матеріалів, розробкою і популяризацією альтернативних палив, розгляд проблем хімотології є неможливим без системного підходу. Крім теоретичної складової науки хімотології, невід'ємною є і прикладна складова, завданням якої є забезпечення енергетичної та екологічної безпеки економіки країни, раціональне застосування традиційних і альтернативних паливо-мастильних матеріалів при експлуатації сучасної і перспективної техніки. У статті акцентується увага на тому, що в останні роки однією з найважливіших є екологічна сутність хімотології, яка полягає у максимально можливій мінімізації негативного впливу паливно-мастильних матеріалів і технічних рідин на екосистеми. Крім того стають актуальними процеси регенерації, відновлення якості, утилізації і рециклінгу паливо-мастильних матеріалів. На закінчення даної роботи показано, що фундаментальність науки хімотології полягає в прояві системних методологічних властивостей під час вирішення сучасних інженерних задач вдосконалення техніки і розвитку джерел енергії для двигунів транспортних засобів.

Ключові слова: хімотологія, паливно-мастильні матеріали, техніка, якість, експлуатація, системний підхід.

Надійшла 15.12.2016

Received 15.12.2016

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТИКИ ECONOMIC ASPECTS OF POWER-ENGINEERING

УДК 621.783.2:621.311.16

Ю.Г. Качан, д-р техн. наук, проф.,
В.Л. Коваленко, канд. техн. наук, доц.,
А.А. Візер, асист.,
Запорізька державна інженерна академія

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЇ СПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВИМ ПІДПРИЄМСТВОМ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗА НАЯВНОСТІ У РОБОЧИХ ОБ'ЄМАХ ЙОГО КАМЕРНИХ ПЕЧЕЙ ПРОСТОРОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Виконано аналіз можливості підвищення енергетичної ефективності газових камерних печей ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат». Представлені результати експериментальних досліджень впливу просторового електричного поля на розподіл теплоти у камерах печей.

Ключові слова: енергетична ефективність, камерна піч, споживання природного газу, просторове електричне поле, тепловий баланс, теплота відхідних газів.

Вступ

Згідно Енергетичної стратегії України до 2030р. пріоритетними напрямками енергозбереження є зниження енергоємності виробництва, скорочення споживання первинних паливно-енергетичних ресурсів за рахунок впровадження новітніх енергоефективних та енергозберігаючих заходів. У цілому ж, споживання газу в Україні можна охарактеризувати як надлишкове й нераціональне.

На всі галузі промисловості сумарно припадає близько 40% від загального обсягу споживання природного газу (21 млрд. куб. м.), з них на потреби найбільш енергоємної металургійної галузі – 7 млрд. куб. м. Тому стратегічним завданням державного значення є модернізація промисловості щодо раціональності енерговикористання.

Мета та завдання

Експериментальне підтвердження можливості скорочення споживання камерними печами природного газу та визначення економії останнього за умови створення просторового електричного поля у їх камерах.

Матеріал і результати досліджень

В металургії і машинобудуванні організація виробництва з повним циклом виконання технологічних операцій базується на використанні камерних печей різних конструкцій. Маючи такі значні переваги як широкий спектр регулювання режиму роботи, простота та універсальність конструкції, що дозволяє нагрівати заготовки та деталі різних розмірів, маси і конфігурації, дані установки мають низку суттєвих недоліків. Серед останніх – недосконалість конструкції, значні втрати теплоти з димовими газами, тощо. Це призводить до нераціонального розподілу температури у камері печі і, як наслідок, перевитрати енергоресурсів та зменшення енергетичної ефективності у цілому. Оскільки в установках названого класу у якості палива використовують природний газ, вартість якого на думку більшості українських і закордонних експертів, в найближчій перспективі буде тільки зростати [1], першочергового значення набувають інноваційні рішення щодо їх енергоефективності. Сказане підтверджується досить жорсткими вимогами до сучасних конструкцій печей відносно інтенсифікації теплообміну в їх робочому просторі і зменшення питомої витрати палива [2]. Незважаючи на те, що вже запропоновано багато заходів підвищення енергоефективності такого обладнання ні один з них не передбачає суттєвих змін щодо більш ефективного використання теплоти в об'ємі камери за рахунок зменшення втрат з відхідними газами.

На ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» (ТОВ «ЗТМК») для термообробки металу встановлена камерна піч з викатним подом, яка опалюється природним газом. Для виявлення причин її низької енергоефективності було розраховано тепловий баланс печі, за результатами якого визначено головні статті витрати теплової енергії, де найбільшу частину складає теплота, що втрачається з відхідними газами (37,7%). Тому пошуки шляхів більш ефективного використання теплоти за рахунок зменшення зазначеної статті витрат і викликали дослідницький інтерес [3,4].

Аналіз попередньо виконаних на експериментальній нагрівальній установці досліджень показав,

що вплив електричного поля на формування напрямку переміщення продуктів горіння палива є незаперечним [5,6], а застосування зазначеного методу може підвищити ефективність використання природного газу у теплових агрегатах і дати значну грошову економію [7]. Враховуючи те, що запропонований спосіб управління тепловими потоками за допомогою просторового електричного поля не є технічно складним завданням та не потребує значних капіталовкладень, його і було застосовано на камерній печі ТОВ «ЗТМК» (рис.1).

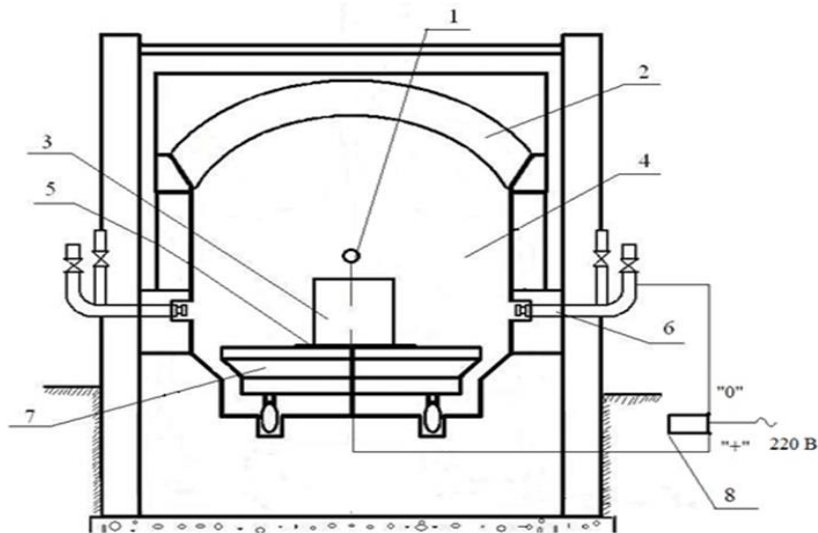


Рисунок1 – Схема застосування методу на камерній печі з підключеною електричною частиною:
 1 – отвір для термопар, через який безконтактно вимірюється температура металу; 2 – склепіння; 3 – метал, що нагрівається; 4 – робочий простір; 5 – електропровідна пластина; 6 – пальник;
 7 – викатний під; 8 – електрична частина

Витрата природного газу вимірювалась газовим лічильником типу РГ 40, значення температур садки та склепіння – безконтактними лазерними пірометрами Optris LaserSight. Експерименти проведено з дотриманням заданого технологією температурно-часового режиму відпалу металу, результати якого наведено на рисунку 2.

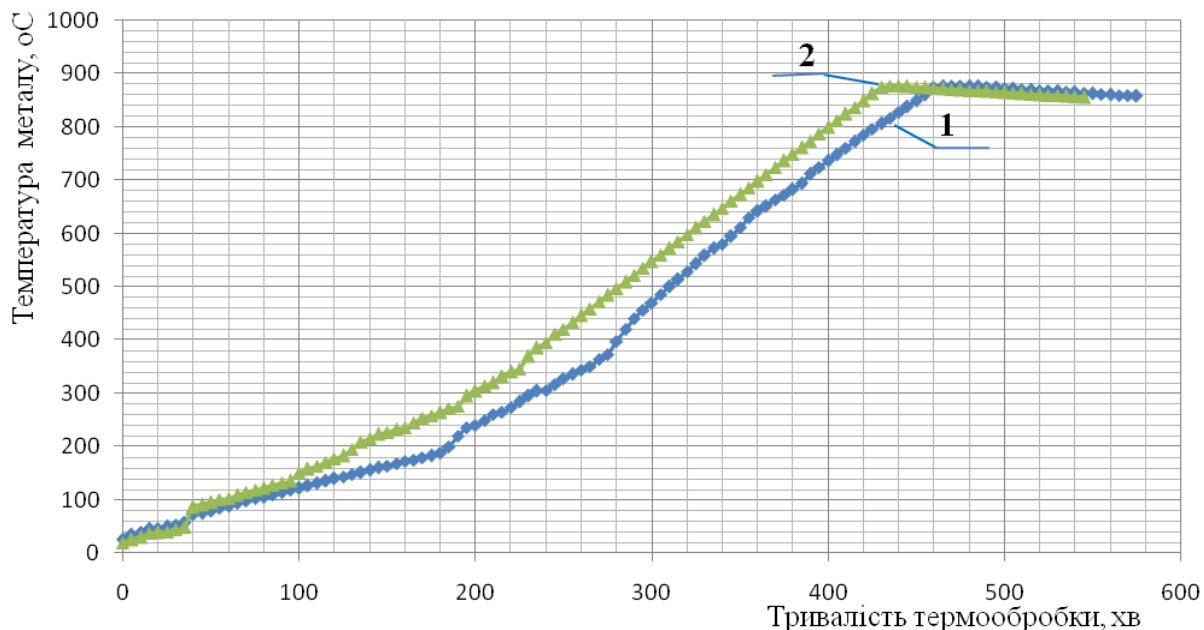


Рисунок2 – Графіки експериментальних значень температур відпалу металу:
 1 – без подачі напруги, 2 – під напругою 1000 В на садку металу

Аналіз графіків показує, що за умови використання запропонованого способу на камерній печі знижується її інерційність. Деталі швидше досягають потрібних температур та спостерігається більш прямолінійна крива відпалу. Все це свідчить про високу рівномірність нагріву садки й забезпечує кращу якість нагріву металу.

На рисунку 3 показано динаміку витрат природного газу у базовому режимі та за умови використання електричного поля у процесі нагрівання і витримки садки металу. Скачки на графіках відповідають почерговому включенню пальників.

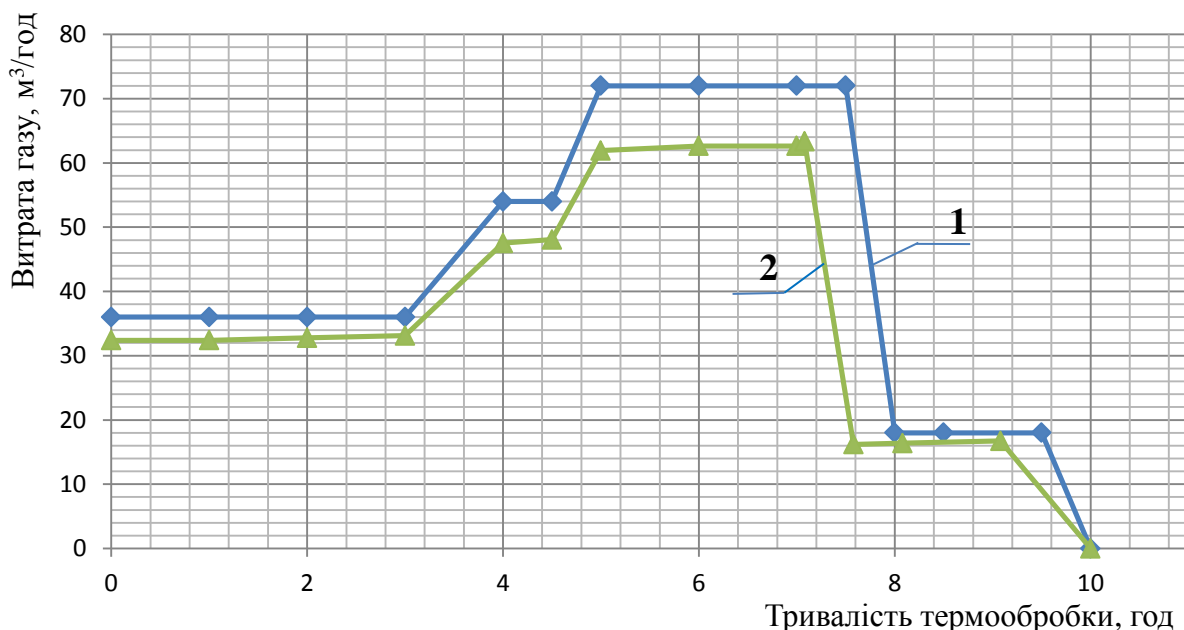


Рисунок 3 – Динаміка витрати газу на камерну піч:
1 – без подачі напруги, 2 – під напругою 1000 В на садку металу

За результатами проведених експериментальних досліджень на печах відпалу за умови використання зазначеного способу за один цикл термічної обробки досягнуто скорочення споживання природного газу до 11 % у порівнянні з показниками діючої печі, що підтверджено відповідним актом.

Висновки

Впровадження запропонованого способу управління тепловими потоками за допомогою просторового електричного поля на камерних печах сприятиме підвищенню їх енергетичної ефективності, при цьому за один цикл термічної обробки можливе скорочення споживання природного газу до 11 %. Простота технічної реалізації методу свідчить про те, що його можна використати в умовах будь-якого підприємства, де використовують аналогічні печі.

Список використаної літератури.

1. Муніципальний енергетичний план Запоріжжя. Концепція. [Електронний ресурс] : – Режим доступу: http://mer.ecosys.com.ua/data/mer_zp_concept.pdf
2. Бергауз, А. Л. Повышение эффективности сжигания топлива в нагревательных и термических печах [Текст] / А.Л. Бергауз, Э.И. Розенфельд. – Л. : Недра, 1984. – 175 с.
3. Сазонов, Э. В. Утилизация теплоты и очистка газовых выбросов: [монография] / Эдуард Владимирович Сазонов. – Воронеж. – 2010. – 142 с.
4. Фиалко, Н. М. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа [Текст] / Н. М. Фиалко, Ю. В. Шеренковский, А. И. Степанова и др. // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т.30, № 3. – С. 68-76.
5. Качан, Ю. Г. Щодо можливості керування тепловими потоками просторовим електричним полем [Текст] / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // *Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины*. – 2013. – № 13. – С. 80-84.
6. Качан, Ю. Г. Моделювання температурного режиму газової нагрівальної печі за наявності просторового електричного поля [Текст] / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2014. – № 2 (36). – С. 30-34.

7. Качан, Ю. Г. Кількісна оцінка ефективності газової нагрівальної установки за умови створення в її камері просторового електричного поля [Текст] / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 4 (38). – С. 14-17.

Y. Kachan, Dr. Sc. Sciences, prof.,
V. Kovalenko Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
A. Vizer, TF

Zaporozhye State Engineering Academy

**ABOUT REDUCING THE NATURAL GAS OF CHAMBER FURNACES IN THE PRESENCE OF
A SPATIAL ELECTRIC FIELD IN ITS CHAMBER AT THE INDUSTRIAL PLANT**

The analysis of increasing the energy efficiency gas chamber furnaces of "Zaporozhye Titanium-Magnesium Combine" Ltd. It was determined that the main part of losses amounts to heat that is lost with the flue gases. The results of industrial researches showed possibility to control heat fluxes using spatial electric field in the chamber of furnaces.

Keywords: energy efficiency, chamber furnace, the consumption of natural gas, the spatial electric field, heat balance, the heat of flue gases.

References

1. The municipal energy plan of Zaporozhye. Concept. [Electronic resource]: – Access: http://mep.ecosys.com.ua/data/mep_zp_concept.pdf.
2. Bergauz, A.L. Improving the efficiency of fuel combustion in heating and thermal furnaces [Text] / A.L. Bergauz, E.I. Rosenfeld. – L: Nedra, 1984. – 175 p.
3. Sazonov E.V. Utilization heat and cleaning of gas emissions: [monograph] / Eduard Vladimirovich Sazonov. – Voronezh. – 2010. – 142 p.
4. Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.I., Stepanova A.I. The effectiveness of heat recovery systems, flue gas of power plants of different types / Industrial heating engineering. – 2008. – Т.30, № 3. – P. 68-76.
5. Kachan, U.G., Kovalenko, V.L., Vizer A.A. About possibility to control heat fluxes using spatial electric fields / Metallurgical heating engineering : collection of scientific labours of the National metallurgical academy of Ukraine. – 2013. – № 13. – P. 80-84.
6. Kachan, U.G., Kovalenko, V.L., Vizer A.A. Modeling of the temperature condition of the gas heating furnace in spatial electric field. / POWER ENGINEERING: Economics, Tehnique, Ecology. – 2014. № 2. – P. 30-34.
7. Kachan, U.G., Kovalenko, V.L., Vizer, A.A. The quantitative analysis of gas heating instalation provided with creation of its space electric field. / POWER ENGINEERING: Economics, Tehnique, Ecology. – 2014. №4. – P. 14-17.

УДК 621.783.2:621.311.16

Ю.Г. Качан, д-р техн. наук, проф.,
В.Л. Коваленко, канд. техн. наук, доц,
А.А. Визер, асист,

Запорожская государственная инженерная академия

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ
ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ НАЛИЧИИ В РАБОЧИХ ОБЪЕМАХ ЕГО КАМЕРНЫХ ПЕЧЕЙ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

Выполнен анализ возможности повышения энергетической эффективности газовых камерных печей ООО «Запорожский титано-магниеый комбинат». Представлены результаты экспериментальных исследований влияния пространственного электрического поля на распределение теплоты в камерах печей.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, камерная печь, потребление природного газа, пространственное электрическое поле, тепловой баланс, теплота отходящих газов.

Надійшла 23.02.2017

Received 23.02.2017

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, 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) – **кегель 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 наводяться 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.** Рекомендуються 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 використаних 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 лексикону 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