



Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**V Міжнародна науково-технічна  
конференція «Енергоефективність  
та енергетична безпека  
електроенергетичних систем»**

**EEES-2021**

*Збірник наукових праць*

**9-12 листопада 2021 р.**

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»**  
**Університет Обуда (Угорщина)**  
**Технічний університет у Кошицях (Словаччина)**  
**Державний біотехнологічний університет**  
**Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго»**  
**Акціонерне товариство «Харківобленерго»**  
**Публічне акціонерне товариство «Завод Південкабель»**  
**Харківське регіональне науково-технічне товариство енергетиків та**  
**електротехніків**

**ЗБІРНИК  
НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

**V Міжнародної науково-технічної конференції**

**«ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ (EEES-2021)»**

**9 - 12 листопада 2021 р.**  
**Друкарня Мадрид**  
**Україна, Харків**

УДК 621.31  
П99

**Редакційна колегія:**

Довгалюк О. М., Шутенко О. В.,  
Кулик О. С., Пономаренко С. Г.,  
Яковенко І. С.

V Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність П99 та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2021)»: збірник наукових праць. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 117 с.

ISBN 978-617-7988-74-7

До збірника включені наукові доповіді учасників конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2021)».

**УДК 621.31**

Матеріали збірника публікуються в авторському варіанті без редагування

Видання підготовлено кафедрою передачі електричної енергії  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»

ISBN 978-617-7988-74-7

© НТУ «ХПІ», 2021

© ТОВ «Друкарня Мадрид», 2021

**НАУКОВИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ:**

**Марченко Андрій Петрович** – проректор НТУ «ХПІ» з наукової роботи, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, академік АН вищої школи України, д.т.н., проф., Україна;

**Лісачук Георгій Вікторович** – завідувачий науково-дослідною частиною НТУ «ХПІ», д.т.н., проф., лауреат Державної премії України, заслужений діяч науки і техніки України, Україна;

**Томашевський Роман Сергійович** – д.т.н, с.н.с., директор навчально-наукового інституту енергетики, електроніки та електромеханіки НТУ «ХПІ», проф. кафедри промислової і біомедичної електроніки, Україна;

**Морва Джордж** – д.т.н., проф., проф. електротехнічного факультету Університету Обуда, Будапешт, Угорщина;

**Колкун Міхал** – д.т.н., проф., завідувач кафедри електроенергетики, факультет електротехніки та інформатики Технічного університету у Кошицях, Кошице, Словаччина;

**Абдельрахим Фарг Алла Фадль Алла** – к.т.н., доцент інженерного факультету Університету Ель-Баха, Ель-Баха, Королівство Саудівської Аравії;

**Сами Мохамед Махмуд** – к.т.н., доцент кафедри електротехніки інженерного факультету Університету Бені-Суейф, Бені-Суейф, Єгипет;

**Шевченко Сергій Юрійович** – д.т.н., проф., завідувач кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ», Україна;

**Лазуренко Олександр Павлович** – к.т.н., доц., проф. НТУ «ХПІ», завідувач кафедри електричних станцій НТУ «ХПІ», Україна;

**Кессасєв Олександр Геннадійович** – к.т.н., завідувач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ», Україна;

**Гриб Олег Герасимович** – д.т.н, проф., проф. кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем НТУ «ХПІ», Україна;

**Безпрозванних Ганна Вікторівна** – д.т.н., проф., проф. кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ», Україна;

**Черкашина Вероніка Вікторівна** – д.т.н., доц., проф. кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ», Україна;

**Довгалоук Оксана Миколаївна** – к.т.н., доц., професор кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ», Україна;

**Шутенко Олег Володимирович** – к.т.н., доц., доцент кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ», Україна;

**Мірошник Олександр Олександрович** – д.т.н., проф., завідувач кафедри енергопостачання та енергетичного менеджменту ДБТУ, Україна;

**Мороз Олександр Миколайович** – д.т.н., проф., директор навчально-наукового інституту енергетики та комп'ютерних технологій ДБТУ, Україна;

**Золотарьов Володимир Михайлович** – д.т.н., проф., генеральний директор ПАТ «Завод Південкабель», Україна;

**Антонець Юрій Опанасович** – к.т.н., технічний директор ПАТ «Завод Південкабель», Україна;

**Ганус Олексій Іванович** – к.т.н., доц., технічний директор АТ «Харків-обленерго», Україна;

**Старков Костянтин Олександрович** – к.т.н., доц., заступник начальника виробничо-технічного управління АТ «Харківобленерго», Україна;

**ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ:**

**Данильченко Дмитро Олексійович** – к.т.н., доц., доцент кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХП», Україна;

**Дривецький Станіслав Ігорович** – к.т.н., асистент кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХП», Україна;

**Федосєєнко Олена Миколаївна** – к.т.н., доцент кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХП», Україна;

**Кулик Олексій Сергійович** – аспірант кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХП», Україна;

**Пономаренко Сергій Григорович** – аспірант кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХП», Україна;

**Яковенко Іван Сергійович** – аспірант кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХП», Україна.

## ЗМІСТ

ANALYSIS OF ELECTRICITY NETWORK MODES WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES Abdeerahim F.A.F.A., Dovgalyuk O.M., Samy M.M.....	10
ANALYSIS OF THE PECULIARITIES OF THE USE OF GRAVITY ENERGY STORAGE SYSTEMS IN UKRAINIAN ELECTRIC NETWORKS Dovgalyuk O.M., Yakovenko I.S., Bondarenko R.V.....	12
ANALYSIS OF VARIOUS METHODS FOR DIAGNOSING THE CONDITION OF OIL-FILLED EQUIPMENT BASED ON THE DISSOLVED GAS ANALYSIS Kulyk O.S. ....	15
INSTALLATION OF A REACTIVE POWER SOURCE AT A DEAD-END SUBSTATION Kuznetsov D.S., Danylchenko D.O. ....	17
THE ACCOUNTING OF SURFACE DUSTINESS IN SIMULATION OF SOLAR POWER PLANT GENERATION UNDER OPERATING CONDITION WITH ADJUSTMENT TO THE POSSIBILITY OF CLEANING Potryvai A., Danylchenko D., Qawaqzeh M.Z.....	19
IMPROVEMENT OF METHODS OF CALCULATION OF LIGHTNING RESISTANCE OF POWER TRANSMISSION LINES WITH PROTECTED WIRES Shevchenko S.Yu., Danylchenko D.O., Dryvetskyi S.I. ....	22
MOSFET-TRANSISTOR ELECTRONIC LOAD FOR SOLAR CELL TEST Zaitsev R.V. ....	23
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВПЛИВУ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СКЛАДОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ОБ'ЄКТИ Асадов Е.Д., Шевченко С.Ю. ....	25
ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ВТРАТ НАПРУГИ В ТРОЛЕЯХ ШИНОПРОВОДА З ВРАХУВАННЯМ ДІЇ ВИЩІХ ГАРМОНІК СТРУМУ Безверхня Ю.С., Коцур М.І.....	26
УДОСКОНАЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ВТРАТ НАПРУГИ В ТРОЛЕЯХ ШИНОПРОВОДА ПРИ РОБОТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОСТОВОГО КРАНУ Безверхня Ю.С., Коцур М.І.....	27

ПЕРЕНАПРУГИ В ЧАСОВІЙ ТА ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТЯХ ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ СИЛОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ В ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ Безпрозванних Г.В., Кессаєв О.Г. ....	28
ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ПРИ КОМУТАЦІЇ ПРИЙМАЧІВ З ІМПУЛЬСНИМИ БЛОКАМИ ЖИВЛЕННЯ Бодунов В.М., Безручко В.М., Приступа А.Л. ....	31
ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ОПОР З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В УКРАЇНІ Бондаренко Р.В., Довгалюк О.М., Яковенко І.С. ....	33
УТОЧНЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ЛІНІЙНОГО ІЗОЛЯТОРА З ЗАБРУДНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ Борзенков І.І., Шевченко С.Ю., Данильченко Д.О., Лебединський І.Л., Загородня Т.М. ....	35
ПЕРСПЕКТИВИ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЗАЛІЗНИЦІ Босий Д.О., Земський Д.Р. ....	37
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОБЛОКОМ В НЕШТАТНИХ РЕЖИМАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ Буданов П.Ф., Бровко К.Ю., Кирисов І.Г., Хом'як Е.А. ....	39
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ШАРУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА Буданов П.Ф., Кирисов І.Г. ....	41
АНАЛІЗ ХАРАКТЕРУ ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРУГИ Ганус О.І., Старков К.О. ....	42
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ОСВІТЛЕННЯ МІСТ Говоров П.П., Кіндінова А.К., Іванкова І.Г. ....	44
НОВІТНІ КОНЦЕПЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ В СИЛОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЯХ Гринишина М.В. ....	46
ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО МІСЦЯ ВСТАНОВЛЕННЯ СЕКЦІОНАЛАЙЗЕРІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 6-10 КВ Діхтярук І.В., Буйний Р.О. ....	48
ВПЛИВ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ Добровольська Л.Н. ....	50

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ	
Довгалюк О.М., Омеляненко Г.В., Мірошник К.А., Яковенко І.С.....	51
ВПЛИВ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ	
Довгалюк О.М., Стріляний І.Ю., Зіньков О.В. ....	53
ОСНОВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІТЧИЗНЯНИХ НАУКОВЦІВ, ПРИСВЯЧЕНІ ПРОБЛЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЮ СТІЙКОЇ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ	
Дяговченко І.М., Василець С.В., Лебедка С.М., Петровський М.В.....	55
МОДЕЛЬ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВВОДА ДЛЯ АНАЛІЗА ЧУТЛИВОСТІ ПРИСТРОЮ ДО ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ВНУТРІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ	
Загайнова О.О., Сердюкова Г.М. ....	56
МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІННОГО БЛОКУ ДЛЯ РВ/Т СИСТЕМИ	
Зайцев Р.В., Войтович Ю.С., Мінакова К.О., Кіріченко М.В., Сτισло Б.О. ....	58
ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАРІАНТІВ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ	
Зозуля Є.Р., Федосеєнко О.М. ....	60
АНАЛІЗ ОЦІНКИ НОРМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ПІДКЛЮЧЕННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ДО СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	
Калюжний Д.М.....	62
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МІСТ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ	
Коробка В.О., Сиромятнікова Т.В. ....	63
РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ	
Крамський І.О., Петровський М.В., Лебедка С.М., Загородня Т.М.....	65
ОЦІНЮВАННЯ МАКСИМАЛЬНИХ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ГРОЗОЗАХИСНІЙ СИСТЕМІ ПЛ НАПРУГОЮ 750 кВ	
Красножон А.В., Квицинський А.О.....	67
АНАЛІЗ ВИНИКНЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ЄМНІСНИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРУГИ	
Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю., Мельничук В.А.....	69

ЦІЛЬОВА ФУНКЦІЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ УЧАСТІ ПРОСЬЮМЕРІВ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОПЕРАЦІЯХ Кулапін О.В., Махотіло К.В. ....	70
ОДНОВІСНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА Мінакова К.О., Зайцев Р.В. ....	72
ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ГЕНЕРАЦІЮ СЕС Мороз О.М., Мірошник О.О., Павлов А.О., Мішин А.С. ....	74
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ У ВІДПОВІДНОСТІ ДО ГОСТ 13109-97 ТА ДСТУ EN 50160:2014 Ніконов М.С., Петровський М.В., Дяговченко І.М. ....	76
ОСОБЛИВОСТІ ДІАГНОСТИКИ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ ПАПЕРОВО-ПРОСОЧЕНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ У ВИСОКОЧАСТОТНОМУ ДІАПАЗОНІ Москвітін Є.С. ....	77
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ Олійник Ю.С. ....	78
АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ МІСЦЕВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ Перепечений В.О. ....	80
АНАЛІЗ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ОБ'ЄКТАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ Піротті О.Є., Гузін М.Ю. ....	82
АНАЛІЗ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ПРОБИВНОЇ НАПРУГИ МАСЛА В АВТОТРАНСФОРМАТОРАХ 330 КВ Пономаренко С.Г. ....	84
РОЗРОБКА БЛОК-СХЕМ АЛГОРИТМІВ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ВПЛИВУ НА СИНУСОЇДНІСТЬ НАПРУГИ НИЗЬКОВОЛЬТНОЇ МЕРЕЖІ Потикун Н.Ю., Трунова І.М. ....	87
КАБЕЛІ МЕРЕЖ ПРОМИСЛОВОГО ETHERNET Пушкар О.А. ....	89
РЕГУЛЮВАННЯ НЕБАЛАНСІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ЗА РАХУНОК ГІБРИДИЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ Савченко Н.А., Шевченко С.Ю. ....	91
ДИНАМІКА ВИПУСКУ КАБЕЛІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В СВІТІ ТА УКРАЇНІ Сокол-Пруський В.Я. ....	93

СТРАТЕГІЯ КЕРУВАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ Тугай Ю.І., Тютюнник Ф.О., Нікішин Д.А. ....	95
АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ УКРАЇНСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ Черкашина В.В., Баклицький В.М. ....	96
ВПЛИВ ІНДУКОВАНИХ БЛИСКАВКОЮ ПЕРЕНАПРУГ НА БЛИСКАВКОЗАХИСТ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРОВІДІВ Шевченко С.Ю., Дривецький С.І. ....	98
ВПЛИВ ВТРАТ НА КОРОНУ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ Шевченко С.Ю., Олубакінде Е. ....	100
ВТРАТИ НА КОРОНУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ Шевченко С.Ю., Олубакінде Е. ....	102
АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ ЗМІНИ НОМОГРАМ ДЕФЕКТІВ Шутенко О.В. ....	104
ДІАГНОСТИКА СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ МАСЛОПОВНЕНИХ ВВОДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОШЕНЬ ПРАВДОПОДІБНОСТІ Шутенко О.В., Загайнова О.А. ....	108
РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ ДЕФЕКТІВ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ РОЗЧИНЕНИХ В МАСЛІ ГАЗІВ В ДІАГНОСТИЧНИХ ПРОСТОРАХ РІЗНОГО ТИПУ Шутенко О.В., Кулик О.С. ....	111
АНАЛІЗ ХАРАКТЕРУ ЗМІНИ ПОКАЗНИКІВ МАСЕЛ В ПРОЦЕСІ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ Шутенко О.В., Пономаренко С.Г., Холодний О.Г. ....	113
АНАЛІЗ СПОСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ Щербак І.Є., Чміль І.Ю. ....	116

UDC 621.311

**ANALYSIS OF ELECTRICITY NETWORK MODES  
WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES****Abdeelrahim F.A.F.A.<sup>1</sup>, Dovgalyuk O.M.<sup>2</sup>, Samy M.M.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> *Al-Baha University, Kingdom of Saudi Arabia, Al-Baha*<sup>2</sup> *National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine, Kharkiv*<sup>3</sup> *Beni-Suef University, Egypt, Beni-Suef*

The current stage of energy development is characterised by significant structural changes in the energy systems of many countries around the world, with a focus on the widespread use of inexpensive and easily accessible energy sources. The key to these conversions is the integration of a significant number of different renewable energy sources (RESs) with a wide range of capacities. According to the International Energy Agency, the share of renewable energy in global electricity generation will increase from 26% in 2019 to 30% in 2024, with total capacity generated from renewables increasing by 50% [1].

Such changes lead to an increased impact of RESs on the operation modes of electric networks of different voltage classes due to the stochastic nature of power output from such sources [2, 3]. In this context, the task of developing and implementing measures to meet the requirements for the operation of electricity networks becomes relevant.

An analysis of the current operating conditions of electricity networks with RESs, as well as trends in further energy development worldwide, has shown that the impact of RESs on the operation of electricity distribution networks is very significant [4]. The generation of RESs power leads to changes in the power flows along transmission lines, which requires a check on the capacity of the distribution network equipment as well as the adopted schemes. As a result of these changes, low- and medium-voltage electric networks are changing their functions from passive power distribution to active, intelligent control with bidirectional flows of electricity to consumers.

Increasing the capacity of RESs for the electricity supply network changes the power balance in electric energy system (EES) and can have a significant impact on the regime parameters of the energy system and its stability. Automation, which ensures the operation of the electric energy system, has an important role to play in such an environment. Automation for limiting voltage and frequency drops and increases and for preventing instability must take account of the corresponding changes in system parameters due to the operation of the RESs. In addition, the system operator must plan the modes using reliable forecast models of RESs generation, as well as taking into account the possibilities to limit the output of RESs.

The interaction between supply and distribution electrical networks changes significantly under such conditions, as illustrated in Fig. 1. As a result, the directions of power flows and operational signals are not only from the electricity transmission

system to the distribution system, but also in the opposite direction.

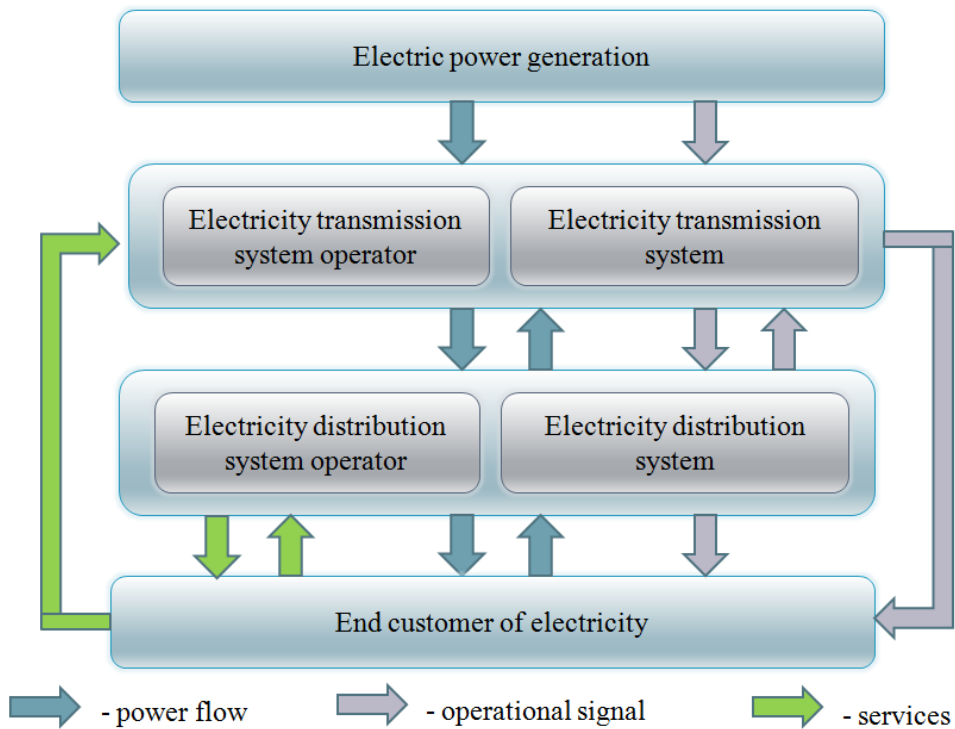


Figure 1 – Schematic diagram of the interaction between electricity supply and distribution networks

It should be noted that the issue of RESs compliance with the necessary technical requirements should be particularly important in such a situation. RESs can be a potential source of accidents if these requirements are not met. All these technical requirements must be set at the level of regulator documents, as they determine the energy security and reliability of the operation of the energy system.

Thus, each energy system has its own aspects of RESs integration, depending on the current energy market model, the type of RESs and their share in the structure of generation capacity, the degree of automation of energy system operation modes, and the implementation of Smart Grid technologies. This requires detailed consideration to form an optimal process for operating the electrical networks and energy systems as a whole.

### References:

1. International Energy Agency. [Online]. – Available: <https://www.iea.org/>.
2. Eteiba M.B., Barakat S., Samy M.M., Wahba W.I. Optimization of an off-grid PV/Biomass hybrid system with different battery technologies / *Sustainable Cities and Society*. – 2018. – Vol. 40. – P. 713-727. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.012.
3. Dovgalyuk O., Omelianenko H., Bondarenko R., Yakovenko I., Saidov S., Strilyaniy I. Analysis of Operation Modes of Electric Networks with Solar Power Plants / *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2020, pp. 196-201, doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263215.
4. Dovgalyuk O., Omelianenko H., Pirotti A., Bondarenko R., Syromyatnikova T. Reliability Increase of the Distribution Electric Networks Operation in the Implementation of the Energy Market in Ukraine / *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2019, pp. 70-75, doi: 10.1109/ESS.2019.8764243.

UDC 621.311

**ANALYSIS OF THE PECULIARITIES OF THE USE OF GRAVITY ENERGY STORAGE SYSTEMS IN UKRAINIAN ELECTRIC NETWORKS****Dovgalyuk O.M., Yakovenko I.S., Bondarenko R.V.***National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine, Kharkiv*

The active development of energy storage technologies that is taking place in the world today is contributing to the wide spread of different types of energy storage systems (ESSs) in different areas of society: households, utilities, transport systems, energy sector and others. Among the range of tasks in the energy sector for which ESSs are used are covering peak load intervals in the energy power system, balancing power output schedules with renewable energy sources (RESs), optimising power plant load, improving the reliability and quality of power supply, regulating frequency in power systems and many others.

Experience of implementation and operation of gravity ESSs in energy power systems around the world [1-3], shows that such systems have many advantages in comparison with others, due to which they have proven themselves in the operation of electric networks of different voltage classes. This indicates that gravity ESSs has a great potential for use in Ukraine.

In order to make an objective assessment of the prospects of using gravity ESSs, the types of storage systems that have the best prospects for implementation in Ukrainian electric networks have been highlighted. The landscape conditions, construction requirements and future operating conditions of the ESSs were taken into account for the correct justification. Hydroelectric storage power plants (HSPPs), as well as ESSs located in a vertical shaft, in a mountain range or excavation, on railway tracks and hydraulic systems have been ranked as the most promising for implementation in Ukraine based on comparison. An analysis of the functional and technical characteristics and a calculation of the main parameters determining their efficiency has been carried out for them. The impact of each of the gravity ESSs under consideration on the operating modes of the electric network as well as on the environment for different operating conditions has been determined. The main technical characteristics of the compared ESSs are shown in Table 1.

The solution of the task of comparing several gravity ESSs of different types, which can be operated under the same conditions, requires a quantitative assessment of the efficiency of gravity ESSs in electric networks. A technical and economic indicator, which takes into account the characteristics of energy accumulation and storage as well as the impact of each storage system on the electric network and the environment, has been developed as a criterion for comparing ESSs [4].

Table 1 – Indicators describing the functioning of the ESSs

Indicator	Type of gravity ESS			
	Placed in a vertical shaft	Placed in a mountain range or excavation	Placed on the railway tracks	Hydraulic system
Implementation costs, ths. doll./kWh	420÷620	400÷600	200÷320	500÷650
Efficiency, r.u.	0.83	0.85	0.8	0.9
Stored energy, kW	25÷30	20÷27	18÷24	25÷28
Flexibility, h	0.4	0.4	0.5	0.4
Maximum duration of discharge, h	2	2	2	2

The use of this criterion enabled calculations to be made to analyse the prospects for the use of gravity ESSs in different regions of Ukraine, which are characterised by different geographical and natural features. The tasks to be solved have been classified according to the type of gravity SNEs used and the amount of energy they generate and deliver to the electricity network. The results of these calculations are presented in Table 2.

Table 2 – Results of the calculation of the efficiency criterion for the use of gravity ESSs in Ukrainian electric networks

Indicator	Type of gravity ESS				
	1	2	3	4	5
Characteristics of the ESSs	HSPF	Placed in a vertical shaft	Placed in a mountain range or excavation	Hydraulic system	Placed on the railway tracks
Estimated values of the efficiency factor of the ESSs, r.u.	0.23÷0.79	0.35÷0.87	0.47÷0.92	0.35÷0.85	0.55÷0.98

Analysis of the calculation results made it possible to assess the prospects of introducing gravity ESSs in the electric networks of Ukraine and to group the most promising types of gravity ESSs for solving problems in the energy sector by individual regions of the country (Fig. 1).

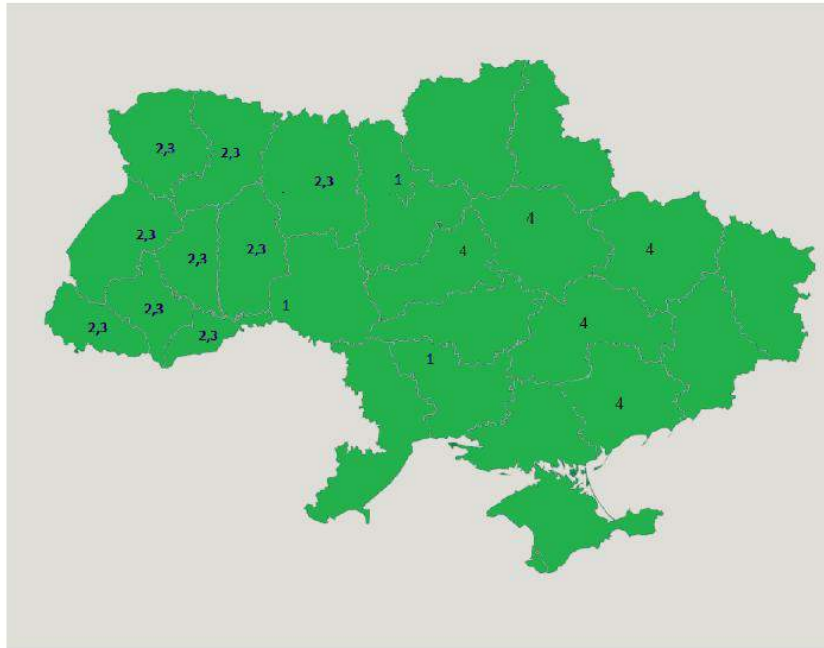


Figure 1 – Regions of Ukraine with the most promising types of gravity ESSs for solving problems in the energy sector: 1 - HSP; 2 - ESSs in a vertical shaft; 3 - ESSs in a mountain range or excavation; 4 - hydraulic ESSs

Thus, the performed analysis of the peculiarities of the use of gravity ESSs in the electric networks of Ukraine showed that the HSPs have good technical and economic indicators of operation, but that they have almost exhausted their potential to increase installed capacity and currently operate mainly in the segment of the balancing energy market. To solve the problems of balancing power and improving the operating parameters of energy power systems, increasing the stability of RESs in the electric networks of Ukraine it is advisable to use gravity ESSs of different types: placed in vertical shafts, in mountain range or excavations, on railway tracks, as well as hydraulic ESSs. Justification of the type of gravity ESSs requires quantitative consideration of the operating characteristics of the specific conditions, which are determined by geographical, climatic, economic and other factors.

#### References:

1. Berrada A., Loudiyi K., Gravity Energy Storage. San Diego, USA: Elsevier Science, 2019, 186 p.
2. Ruoso A. C. Storage Gravitational Energy for Small Scale Industrial and Residential Applications / A. C. Ruoso, N. R. Caetano, L. A. O. Rocha // *Inventions*, vol. 4. – 2019. – P. 64.
3. De la Torre S., Aguado J. A., Abreu-Caracuel L. Optimal Operation of an Energy Storage System Based on Gravitational Energy Using a Dedicated Railway System. 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC46532.2019.8952252.
4. O. Dovgalyuk, I. Yakovenko and R. Bondarenko, "Prospects for Gravity Energy Storage Systems in Ukrainian Electric Power Networks," *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2021, pp. 622-627, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569966.

UDC 621.314.212:543.544.3

**ANALYSIS OF VARIOUS METHODS FOR DIAGNOSING THE CONDITION OF OIL-FILLED EQUIPMENT BASED ON THE DISSOLVED GAS ANALYSIS****Kulyk O.S.***National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine, Kharkiv*

Today, many countries in the world have an aged fleet of power equipment and none of the countries can afford to replace it completely with new one. In this connection, the task of prolongation of service life of this equipment including oil-filled ones is actual. One of the ways to reduce damageability of such equipment and, consequently, to extend its service life, is development of new and improvement of existing methods of non-destructive diagnostics. Analysis of gases dissolved in oil (DGA) is one of such methods, which found the widest application both in Ukraine and abroad. This method makes it possible not only to detect defects that develop in oil-filled equipment at an early stage, but also to recognise their type. The latter is crucial in deciding whether it is possible to continue operating the equipment. This results in high demands on the reliability of defect type recognition.

According to existing methods for interpreting DGA results, defect type recognition is performed using different diagnostic criteria [1], the most common of which are characteristic gas ratios, gas percentages or gas-to-gas ratios with a maximum concentration. However, the use of different diagnostic criteria used in different methods when recognising the same defect type can lead to different diagnoses, as shown prominently in [2]. The conventional DGA based fault diagnosis techniques are empirically derived and much dependent on the vast knowledge of experts of this field. At the same time, different intelligent techniques, which are based primarily on the application of machine learning methods and help to eliminate the resulting uncertainties when using conventional DGA methods, are quite widely used. Consequently, the use of intelligent methods enhance the performance of classical DGA methods. At the same time, these methods are applied either independently or in combination with traditional interpretation schemes to improve fault classification [3]. The analysis of literature sources has shown that among intelligent methods such machine learning methods as fuzzy logic, artificial neural network, adaptive neuro fuzzy inference system, support vector machine, gene expression programming, k nearest neighbours, etc. are the most popular. Moreover, the use of such methods does increase the reliability of equipment defect type recognition as compared to the use of conventional DGA methods. In addition, besides machine learning methods, new diagnostic methods based on the use of already known diagnostic criteria, methods of DGA results analysis based on the application of mathematical and statistical approach, as well as experimental approaches, such as sensors and/or spectroscopy, etc. are also applied.

However, the use of both traditional and modern diagnostic approaches has advantages and disadvantages [3] (Table 1). As can be seen from the table, none of the considered diagnostic methods can unequivocally answer the question "which diagnostic method is better?" In addition, unexplored or understudied areas DGA based fault diagnosis are the intelligent integrated methods, diagnosis of multiple incipient and/or combined faults

and X-wax deposits [4], as well as online sensor based condition monitoring system. Thus, there is a need for further research into different DGA-based diagnostic methods in order to find the best one.

Table 1 – Advantages and disadvantages of using different diagnostic methods

Methods discussed	Advantages	Disadvantages
Conventional DGA	Simple economic and reliable methods for detecting incipient faults and overall health of transformers	Unresolved diagnosis, dependency on expert opinion. Cannot detect multiple incipient faults
Application of single intelligent techniques to DGA methods	With the application of these techniques improvement in the diagnosis is observed. Multiple fault detection possible to some extent	Appropriate tuning of membership functions/hyper parameters in fuzzy/SVM, the authenticity of training samples in ANN, RBM, Wavelets
Application of hybrid intelligent techniques to DGA methods	With the application of these techniques improvement in the diagnosis is observed	Appropriate tuning of membership functions/hyper parameters in fuzzy/SVM, the authenticity of training samples in ANN, RBM, Wavelets. Less focus on Multiple fault detection
Integrated DGA approaches	Combines the goodness of all conventional methods into a single method thereby increasing the overall accuracy and authenticity of diagnosis. Probability of multiple fault detection	The authenticity of a diagnosed fault depends on the capability of the decision making unit to choose best method/integrate the outputs of all methods
Alternate DGA approaches	No involvement of intelligent technique, hence better accuracy at lesser complexity	Generalisation problem because these are mainly derived from case studies. Absence of multiple fault detection scenarios
DGA data analysis: mathematical and statistical approach	Numerical methods allow faster interpretation of fault data	Development of the model depends upon authenticity of historical data Concurrent fault detection is least addressed
Experimental approaches for DGA	Heart of online fault detection system, low cost non-destructive diagnostic tool	—

### References:

1. Kulyk O. Analysis of the diagnostic criteria used to defect type recognition based on the results of analysis of gases dissolved in oil / Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency. – 2021. – No. 1. – P. 15–25. doi: 10.20998/2224-0349.2020.01.03.
2. Shutenko O., Kulyk O. Comparative Analysis of the Defect Type Recognition Reliability in High-Voltage Power Transformers Using Different Methods of DGA Results Interpretation / 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). Kremenchuk, Ukraine. – 2020. – P. 1–6. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240911.
3. Wani S., Rana A., Sohail S., Rahman O., Parveen S., Khan S. Advances in DGA based condition monitoring of transformers: A review / Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 149. – P. 111347. doi: 10.1016/j.rser.2021.111347.
4. Shutenko O., Kulyk O. Diagnosis of Oil-Filled Equipment with X-Wax Deposition Based on Dissolved Gas Analysis / 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Lviv, Ukraine. – 2021. – P. 1–6. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575623.



Voltage losses on the section of the 35 kV line are calculated by formula 2

$$\Delta U_1 = \frac{P + (Q \cdot X)}{U}, \quad (2)$$

where X is the inductive resistance of the line, Ohm.

We perform calculations for all sections of lines from the substation "Dubrovytsia BPF" to the substation "Stare Selo", the results are summarized in table 1.

Table 1 – Network parameters for the implementation of CI on the substation Stare Selo

Site name	Parameters		
	$I$ , A	$U$ , kV	$\Delta U$ , kV
Dubrovytsia BPF - Dubrovytsia	170.3	34.43	0.564
Dubrovytsia - Lyutynsk	78.5	33.94	0.489
Lyutinsk - Lugove	66.7	33.69	0.252
Lugove – Shahy	56.3	33.39	0.294
Shahy – Stare Selo	36.6	33.13	0.262
$\Sigma$			1.861

Now we calculate the parameters of the normal mode of operation of the power unit, namely the current and voltage in the areas from the substation "DubrovytsiaBPF" to the substation "Stare Selo" after the introduction of CI 700 kVAr at the substation "Stare Selo".

Table 2 – Network parameters after the implementation of CI on the substation Stare Selo

Site name	Parameters		
	$I$ , A	$U$ , kV	$\Delta U$ , kV
Dubrovytsia BPF - Dubrovytsia	166.4	34.48	0.511
Dubrovytsia - Lyutynsk	75.1	34.15	0.33
Lyutinsk - Lugove	63.3	33.98	0.173
Lugove – Shahy	53.1	33.82	0.163
Shahy – Stare Selo	34.1	33.76	0.057
$\Sigma$			1.234

Therefore, as can be seen from the calculations of the reduction of voltage drop during the introduction of CI 700 kVAr is 0.627 kV, and the total reduction of current flow in all sections of the line is 16.3 A.

As can be seen from the above calculations, if you install the CI at a dead-end substation, then in this case the effect of reactive power compensation will be better than if you install CI on the intermediate substation, by unloading all sections of lines from the flow of reactive energy.

UDC 621.311.25

**THE ACCOUNTING OF SURFACE DUSTINESS IN SIMULATION  
OF SOLAR POWER PLANT GENERATION UNDER OPERATING  
CONDITION WITH ADJUSTMENT TO THE POSSIBILITY OF CLEANING**

**Potryvai A.<sup>1</sup>, Danylchenko D.<sup>1</sup>, Qawaqzeh M.Z.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine, Kharkiv*

<sup>2</sup> *Al-Balqa Applied University, Jordan, Al Salt*

In our work, an attempt was made to create a mathematical model, which would clearly demonstrate the need to take into account a large number of environmental factors and encouraged work on creating modules that will describe even more influencing factors. The basis of the work was a simulation model of a solar station proposed in [1] and supplemented by creating a block model of taking into account the impact of dust on the surface of photovoltaic modules on the overall generation of SPP.

The Booger-Lambert-Behr law was adopted as the basis of the mathematical model, because sunlight in the work is considered as electromagnetic radiation, and observation of the SPP allowed us to make assumptions, that the amount of sediment on the surface of the photovoltaic module (PVM) occurs by the slowly increasing exponent, and therefore this process can be described by a formula:

$$N_{dust}(t) = N_0 e^{rt}, \quad (1)$$

where  $N_0$  – the initial amount of dust on the PVM surface;  $r$  – the growth rate of the amount of sediment.

Humidity of air has a significant influence on the growth rate of the amount of settling dust, which must be taken into account to form an accurate schedule.:

$$r = \frac{((\rho - 100) * (-1)) dN}{NDt}, \quad (2)$$

where  $\rho$  – air humidity at a selected time of day.

Therefore, taking into account the above, we obtain a formula for determining the energy lost due to the presence of dust pollution on the surface of the PVM:

$$G_{втрач} = G_0 e^{\left( - \left( N_0 e^{\frac{((\rho - 100) * (-1)) dN}{NDt} t} \right) x \right)}. \quad (3)$$

The presence of precipitation significantly affects the amount of dust that settled on the surface of the PVM, so there is a need to create a unit to account for

changes in the impact of dust FEM on the productivity of SPP depending on the amount of precipitation. Dependence graphs are described in the paper [2].

Test experience shows that in the range from 3 to 7 mm of precipitation is the most effective cleaning of the surface of the PVM, but even in such conditions is not complete removal of contaminants. This is due to the formation of dust accumulations, the removal of which is becoming increasingly difficult, and the process of pollution in the next unit of time begins with a higher level of pollution.

To simplify the work with the schedule, it is proposed to implement it through two block models, because it can be divided into two zones, which can be described by standard functions.

The first (from 0 to 2.9 mm of precipitation) is described by the formula:

$$\eta_{lost.spec} = \eta_{lost} - \frac{\sqrt{Q}}{2}, \quad (4)$$

where  $\eta_{lost}$  – the percentage of energy reported to the surface that is absorbed by the dust layer;  $Q$  – precipitation level at the moment  $t$ .

The second (from 2.9 to 7 mm) is described by the formula:

$$\eta_{kost.spec} = \eta_{lost} e^{(-\frac{dQ}{Qdt})x}. \quad (5)$$

These block models are necessary and sufficient for the initial level of description of the effect of dustiness of the PVM surface on the generation of SPP.

However, this model can be improved by running it in Matlab and supplementing it with the block model shown in Fig. 1. This allows you to adjust the graph and add a human (machine) factor to the modelling (Fig. 2).

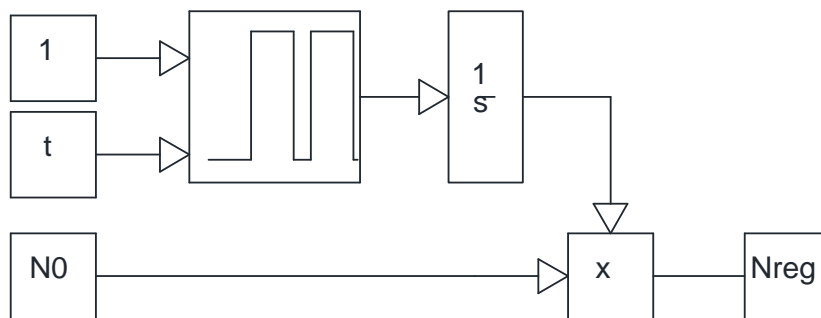


Figure 1 – Block model of accounting for artificial cleaning in the model of the impact of dust FEM its performance

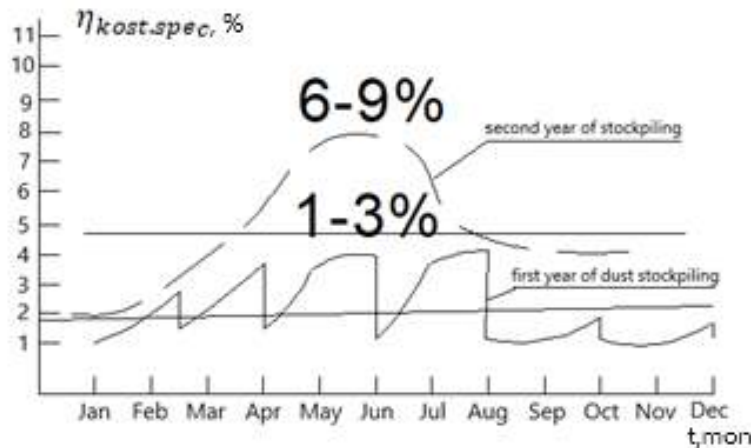


Figure 2 – Comparative graph with the block model of the impact of artificial cleaning and without

*Conclusions.* In this paper, we presented the mathematical model developed by us, which allows to take into account the influence of dustiness of the PVM surface on the generation of SPP and improved the block model, which allows to make adjustments for human (machine) intervention. This model allows to increase the accuracy of simulation of SPP generation by 4.34%, which was tested on a real case and reproduced in the work [3].

### References:

1. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Imitating Model Of Operation Models Of Autonomic Photoelectric Station With Accordance To Real Conditions Of Explosion. Engineering of georesources. – 2017. – T. 328. – № 6. – P. 38–51.
2. Kolomiets Y.G., Tarasenko A.B., Tebuev V.V., Suleimanov M.J. Study of the impact of different types of pollution on the efficiency of solar power plants // International Scientific Journal "Alternative Energy and Environment" (ISJAEE). – 2018. – P. 12-24.
3. Danylchenko D., Potryvai A. Optimization of accumulation units in a mobile, autonomous cottage settlement as a part of maneuvering system. II International Scientific and Technological Conference "Modern problem of power engineering and ways of solving them", Tbilisi, Georgia, December 7-10 – 2020. – P.120.

UDC 621.315.1

**IMPROVEMENT OF METHODS OF CALCULATION  
OF LIGHTNING RESISTANCE OF POWER TRANSMISSION LINES  
WITH PROTECTED WIRES****Shevchenko S.Yu., Danylchenko D.O., Dryvetskyi S.I.***National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine, Kharkiv*

Currently, shielded wires for overhead lines (OHL) are becoming more widespread in Ukraine, due to the technical policy of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. Wire in a protective sheath for overhead lines 6-35 kV, was designed to increase the reliability of distribution and transmission of electricity. The use of wires in the protective sheath has several significant advantages: (reliability, economic feasibility) and a significant disadvantage, which is determined by the need to protect the OHL from lightning surges. The concept of lightning protection is so diverse, in different regions define different methods of choosing the appropriate protection against the threat. Factors in choosing a method of protection are storm activity and its intensity in each region [1].

Analysis of the experience of operation of electrical distribution networks shows that their reliability is lower than that of networks of higher voltage classes. Damage in distribution networks causes most of the damage associated with interruptions in the supply of electricity to consumers. One of the main causes of accidents is lightning surges on the transmission line, which cause impulse overlaps and destruction of insulators and lead to arc short circuits, with associated damage to equipment, line outages [2].

Emergency shutdowns of 6-35 kV overhead lines due to lightning surges account for up to 40% of the total number of their outages. The reliability of electricity supply to consumers largely depends on the effectiveness of lightning protection measures.

Thus, research and development of new and improvement of known methods of lightning protection of lines with shielded wires is an urgent scientific and applied problem that should be solved by conducting research and experiments [3].

**References:**

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс]: стратегія [схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р. № 1071-р]. – Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>.
2. Шаманов Д. Переваги самоутримних ізольованих проводів 6 - 35 кВ. Способи захисту повітряних ліній від грозових перенапруг // Новини електротехніки. – 2002. – № 3 (15).
3. Халилов Ф.Х. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С. и др. Под ред. Халилова Ф.Х., Евдокунина Г.А., Таджибаева А.И. – СПб.: Петербургский энергетический институт повышения квалификации Министерства энергетики Российской Федерации, 2002. – 260 с.

UDC 621.382.323

**MOSFET-TRANSISTOR ELECTRONIC LOAD FOR SOLAR CELL TEST****Zaitsev R.V.***National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ukraine, Kharkiv*

The electronic loads, which are available on the market, combine excellent accuracy with complex control interfaces and, as a rule, capable of operating at very high currents at high power. Different models are usually available, each of them is corresponding to a different voltage, power and current range, the lowest achievable resistance is about 5 mOhm, and the current can reach 80 A.

However, despite these technical characteristics, the overall efficiency of the load array is fundamentally limited by its electrical connection to the tested power supply source. Copper and aluminum conductors with a cross section of 40 mm<sup>2</sup> or more are used for the connection requirements and this connection length imposes significant resistive losses between the tested power supply source and the load modules. This additional resistance affects the load voltage, and the parasitic inductance  $L_p$  in the conductors limits the maximum speed of transients ( $dI/dt$ ):

$$\frac{dI}{dt_{max}} \leq \frac{Vd}{L_p}.$$

Also, for testing more powerful power supply sources, it is possible to combine several of these load modules in parallel (it is possible to achieve an effective resistance below 2.7 mOhm). Moreover, when more and more individual loads that are connected in parallel, the installation becomes larger, and, accordingly, the more resistance busbars and inductive losses on the connection busbar. Obviously, to achieve the highest speed of transients and the lowest total resistance requires a more specialized solution of electronic load.

To simulate the behavior of a powered semiconductor device, we need an electronic load with the following characteristics:

- the highest possible rate of load current increase ( $dI/dt$ ) (at best the rate of increase is also regulated);
- regulated load current;
- high scattering power, both peak and continuous;
- ability to control the load current with high accuracy and wide bandwidth.

To test low voltage power supply sources at very high current levels (e.g. solar modules), the electronic load must have an ultra-low minimum resistance. Finally, the electronic load must be designed for connecting to the test source with minimal resistance and inductance, otherwise the overall efficiency will be limited by the connection itself.

The simplest load that can be offered is a power resistor. If its size and cooling are correct, it can meet the requirement for high power dissipation, and the current can be controlled directly (by measuring the voltage on a known resistor). Sequentially adding a switch allows you to generate a transient load. However, the load will be either fully on or off, and the current will depend on the voltage being tested. The ve-

locity of current change is not controlled or regulated. Obviously, this is not a flexible solution that can be adapted to a wide range of testing requirements.

For providing changeable load and adjustable current reduction velocity (velocity which impact on the load current increases and decreases), it is necessary to build an active circuit based on an operational amplifier. The operational amplifier activates the gate of the power MOSFET transistor to set the controlled voltage on the sensor resistor. It results in a controlled load current flowing from the outlet to the MOSFET source and through the sensor resistor to ground. The power of the MOSFET adds current amplification, but does not add voltage amplification because it works as a current amplifier (source – follower).

This circuit can be implemented with an n-channel MOSFET with a sensor resistor on the lower side or with a p-channel MOSFET with a sensor resistor on the upper side. Anyway, the sensor resistor adds negative reverse connection because it is plugged to a MOSFET source, subtracting the voltage from the gate voltage as the current increases, and vice versa by adding the gate voltage as the current decreases, which promotes stability. The load current, according to the proposed scheme, is proportional to the voltage and the shape of the control signal, while the coefficient of amplification is set by ratio input resistances and reverse connection of resistances.

An active electronic load circuit has many advantages over a simple switching resistor. Unlike simple resistance, active resistance can generate alternating load current from zero to maximum current. Besides, when the load current is controlled by an operational amplifier in a closed loop, the current accurately tracks the control signal. Therefore, the active electronic load can control the rate of decrease of current. Finally, since the circuit has a resistive element with a fixed value, accurate measurement of the load current of the high bandwidth is relatively simple.

Based on the considered physical and circuit solutions for the implementation of the electronic load unit, the electrical circuit shown in Figure 9 was developed. These transistors are controlled by four unipolar operational amplifiers integrated in the LM324 chip. The control of the electronic load unit is realized by controlling the voltage at the positive feedback terminals, which is additionally stabilized by the TL431 chip. The unit is powered by a source of direct stabilized current with a voltage of 12 V (provides additional filtering from voltage fluctuations).

### References:

1. G.C. Mazumder, P.R. Biswas, N. Shams, *et. al.*, “Development of A Computerized I-V-Tracing System for Solar PV Module Testing”, *International Jjournal of Scientific & Technology Research*, vol. 5, no. 6, pp. 328-333, 2016.
2. M.L. Beye, T. Wickramasinghe, J.F. Mognotte, *et. al.*, “Active Gate Driver and Management of the Switching Speed of GaN Transistors during Turn-On and Turn-Off”, *Electronics*, vol. 10, no. 2, pp. 106-119, 2021.
3. A. Tsibizov, I. Kovačević-Badstübner, B. Kakarla, *et. al.*, “Accurate Temperature Estimation of SiC Power mosfets Under Extreme Operating Conditions”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 2, pp. 1855-1865, 2020.
4. Y. Taur, H.-H. Lin, “Modeling of DG MOSFET I – V Characteristics in the Saturation Region”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 65, no. 5, pp. 1714-1720, 2018.
5. M.A. Bin Mohd Yusof, N. Tsukiji, Y. Kobori, *et. al.*, “A Study on Loop Gain Measurement Method Using Output Impedances in Operational Amplifier”, *J. Tech. Soc. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 19-28, 2018.

УДК 538.69.331.45

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВПЛИВУ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СКЛАДОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ОБ'ЄКТИ

Асадов Е.Д., Шевченко С.Ю.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

На сьогоднішній день електромагнітні поля антропогенного походження суттєво перевищують природний фон і є тим чинником, який суттєво і дуже негативно впливає на людину, а також на все оточуюче середовище. Одним із джерел, що генерують електромагнітні поля антропогенного походження, є високовольтні лінії електропередачі (ЛЕП) та енергетичні установки, кількість яких постійно зростає. Як наслідок, в останнє десятиріччя спостерігається значне загальне підвищення електромагнітного фону у населених пунктах [1], завдяки чому електромагнітне забруднення навколишнього середовища стало глобальною проблемою, яка потребує досконалого дослідження та розробки заходів для захисту.

Вирішення задачі поліпшення електромагнітної обстановки потребує отримання достовірної інформації щодо фактичних рівнів електромагнітних полів і випромінювань, їх динаміки та просторових розподілів. До основних методів моніторингу рівня електромагнітного поля відносяться [2]:

- оцінювання санітарно-гігієнічних параметрів довкілля, метою якого є оцінювання поширення рівнів електромагнітного поля на критичних відстанях від досліджуваних об'єктів за результатами розрахунків та моделювання;

- територіальний електромагнітний моніторинг, який включає контроль за емісією великої кількості різномірних джерел полів та випромінювань різних частотних діапазонів з метою оцінки та прогнозування перспектив і можливостей розвитку електричних мереж;

- оперативний моніторинг, який враховує поточний стан та динаміку електромагнітної обстановки, яка є дуже складною, оскільки залежить від багатьох факторів (фактичних навантажень в електричній мережі, кліматичних умов тощо).

Застосування зазначених методів моніторингу рівня електромагнітного поля потребує розробки та впровадження систем електромагнітного моніторингу, які повинні відповідати світовим вимогам щодо технічного та методичного забезпечення.

### Список використаних джерел:

1. Галетич І.К., Решетченко А.І., Бекетов В.Є. Аналіз впливу електромагнітних полів на стан сельбищних територій / Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія». - 2017. - № 15. - С. 113-121.

2. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Засади електромагнітного моніторингу міста в умовах підвищення електромагнітного навантаження на довкілля / Екологічна безпека та природокористування. – 2015. - № 1(17). – С. 28-34.

УДК 621.316.35:006.354

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ВТРАТ НАПРУГИ В ТРОЛЕЯХ ШИНОПРОВОДА З ВРАХУВАННЯМ ДІЇ ВИЩІХ ГАРМОНІК СТРУМУ

Безверхня Ю.С., Коцур М.І.

*Національний університет «Запорізька політехніка», Україна, м. Запоріжжя*

Системи цехового електропостачання повинні відповідати жорстким вимогам високої надійності та ефективності. Одним із важливих компонентів систем цехового електропостачання є тролейні шинопроводи. Існують інженерні методи визначення параметрів, втрат напруги та потужності, але при цьому мають високу похибку [1]; інші методи мають високу ефективність розрахунку, але не дозволяють визначити падіння напруги в залежності від коефіцієнта потужності мережі [2]. Тому поставленою метою є розробка нового підходу, що дозволяє з високою точністю визначити параметри та падіння напруги у тролейних шинопроводах залежно від коефіцієнта потужності мережі, який заснований на декомпозиції електромагнітних процесів у тролейному шинопроводі за допомогою живлення однієї із фаз шинопровода для визначення активного та реактивного опорів без врахування впливу зовнішнього магнітного поля, а також двох фаз шинопровода для визначення активного і реактивного опорів при наявності зовнішнього магнітного поля, викликаного дією сторонніми струмами, що протікають в сусідніх тролейних шинопроводах.

Найбільш суттєвими результатами є визначення на основі польового моделювання активних та реактивних опорів, залежно від частоти гармонік струму та відстані між фазами тролейних шинопроводів. Запропоновано залежності для визначення значень активного та реактивного опорів для відповідних фаз та гармонік струму. Вдосконалено математичну модель втрат напруги в тролейних шинопроводах від коефіцієнта потужності мережі. Дані експериментального дослідження підтверджують високу ефективність та точність підходу. Значимість результатів полягає у більш точному визначенні параметрів та втрат напруги в кожній фазі тролейних шинопроводів незалежно від їх розташування, кількості, форми, а також симетрії струмів без витрат часу на польове моделювання.

### Список використаних джерел:

1. Федоров, А. А. Справочник энергетика промышленных предприятий. Том 1 / А. А. Федорова, Г. В. Сербиновский, Я. М. Большам. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 840с.
2. Popa I. C. Numerical modeling of three-phase busbar systems: Calculation of the thermal field and electrodynamic forces / I. C. Popa, A. I. Dolan International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, Romania, November 2016.

УДК 621.316.35:006.354

**УДОСКОНАЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ВТРАТ НАПРУГИ В ТРОЛЕЯХ ШИНОПРОВОДА ПРИ РОБОТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОСТОВОГО КРАНУ****Безверхня Ю.С., Коцур М.І.***Національний університет «Запорізька політехніка», Україна, м. Запоріжжя*

Впровадження частотно-регульованих електропроводів, випрямлячів та інших напівпровідникових перетворювачів призводить до генерації вищих гармонік струму в тролейних шинопроводах. Наявність вищих гармонік призводить до істотного збільшення параметрів, втрат напруги, активних втрат в тролейних шинопроводах, що в окремих випадках, в залежності від конфігурації системи живлення тролей шинопровода може призвести до аварійного режиму роботи мостового крану [1]. Тому була розроблена імітаційна модель взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та струмопровідними елементами системи електропостачання, яка за даними польового розрахунку дозволяє використовувати інтегровані параметри тролей шинопровода з врахуванням скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та інших крайових ефектів, форми та розташування тролей в шинопроводі, відстаней між ними і кількістю фаз шинопровода, в залежності від особливості режимів роботи електроприводу та розташування мостового крану від точки живлення секцій тролей шинопровода. Проведено дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та тролейми шинопровода. Встановлені закономірності втрат напруги в тролейних шинопроводах від моменту асинхронного електроприводу, що дозволяють, як при основній та і при вищих гармоніках струму, визначити максимально допустиму відстань переміщення мостового крану до точки підживлення секції тролей шинопровода, при якій забезпечується безаварійна робота електроприводу мостового крану, визначити кількість та відстані між точками підживлення секцій тролей шинопровода, що забезпечить однаковий рівень втрат напруги, активних втрат в тролейних шинопроводах при основній гармоніці струму і при дії вищих гармонік струму.

**Список використаних джерел:**

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко 3-е изд., перераб. и доп. - М: Энергоатомиздат, 2000. - 331 с.

УДК 621.315.2.016.2

## ПЕРЕНАПРУГИ В ЧАСОВІЙ ТА ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТЯХ ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ СИЛОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ В ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ

Безпрозваних Г.В., Кєссаєв О.Г.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

З недавнього часу однією з тенденцій розвитку енергетики в світі є використання опор з композитного матеріалу. Таким опорам властиві простота конструкції, високі механічні характеристики, мала вага, високі діелектричні властивості, тривалий термін експлуатації [1]. У зв'язку з цим на сьогоднішній день такі опори застосовуються в електричних мережах практично в будь-яких класах напруги (від опор для освітлення напругою 0,4 кВ до магістральних ліній електропередачі (ЛЕП) напругою 500 кВ).

Гармонійний резонанс є важливим фактором, який слід враховувати в мережах передачі електроенергії під час підключення віддалених генераторних установок до високовольтних силових кабелів зі зшитю поліетиленовою ізоляцією, зокрема, вітряних або сонячних електростанцій [1-3]. Характеристики кабелю відрізняються від характеристик звичайних повітряних ліній. Ємність кабелю набагато вище ніж ємність еквівалентної повітряної лінії, що потенційно може призвести до резонансних частот в низькочастотному діапазоні, які можуть бути викликані включенням трансформатора або шунтуючого реактора. Через високу ємність кабелю може почати протікати струм навіть якщо кабель розвантажений. Цей ємнісний зарядний струм і його значення в залежності від рівня напруги може бути в 50-60 разів вище, ніж у повітряної лінії. Отже, впровадження силових кабелів з вулканізованою ізоляцією збільшує ємність системи, що зміщує резонансні частоти в мережі ближче до робочої частоти 50 Гц. Це вказує на необхідність виконання необхідного технічного аналізу, особливо перенапруг не тільки в часовій, але і в частотній областях.

На рис. 1 представлено схему заміщення одножильного силового кабелю, який підключено до джерела напруги  $E_s$  з комплексним імпедансом (хвильовим опором)  $Z_s$  та навантаження  $Z_{load}$ , за умови двостороннього заземлення металевого екрану. Кабель представлено T-подібною схемою заміщення з погонними параметрами (на одиницю довжини):  $R_g$ ,  $L_g$ , – активний опір та внутрішня індуктивність струмопровідної жили;  $L_v$  – зовнішня (міжпровідникова) індуктивність кабелю;  $C$  та  $G_{ins}$  – ємність та активна провідність ізоляції.

На рис. 2 представлено результати чисельного моделювання впливу модулів імпедансів джерела напруги  $Z_s$  та навантаження  $Z_{load}$  на значення напруги в силовому кабелі в часовій (рис. 2,а) та частотній (рис.2,б) областях відповідно. Моделювання виконано на підставі методу дискретних резистивних схем

заміщення для силового однофазного кабелю на лінійну напругу 35 кВ з перерізом струмопровідної жили 240 мм<sup>2</sup> довжиною 100 метрів за результатами вимірювань параметрів кабелю в діапазоні частоти 100 Гц – 1000 Гц.

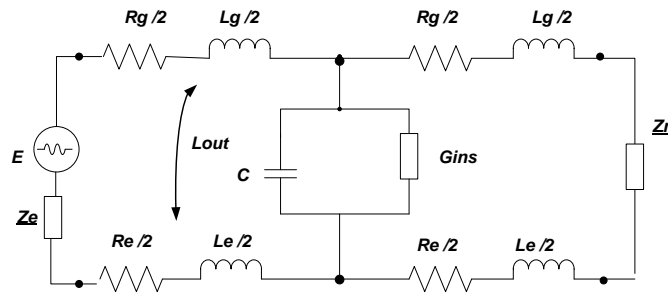


Рисунок 1 – Спрощена схема заміщення кабелю в електричній мережі

Крива 1 відповідає узгодженому режиму роботи кабельної лінії (модулі імпедансів навантаження, джерела та кабелю – однакові); крива 2 – імпеданси кабелю та навантаження – однакові; крива 3 – імпеданси джерела та навантаження – однакові та в 10 разів менше значення імпедансу кабелю; 4 – імпеданс навантаження в 100 разів менше значення імпедансу кабелю.

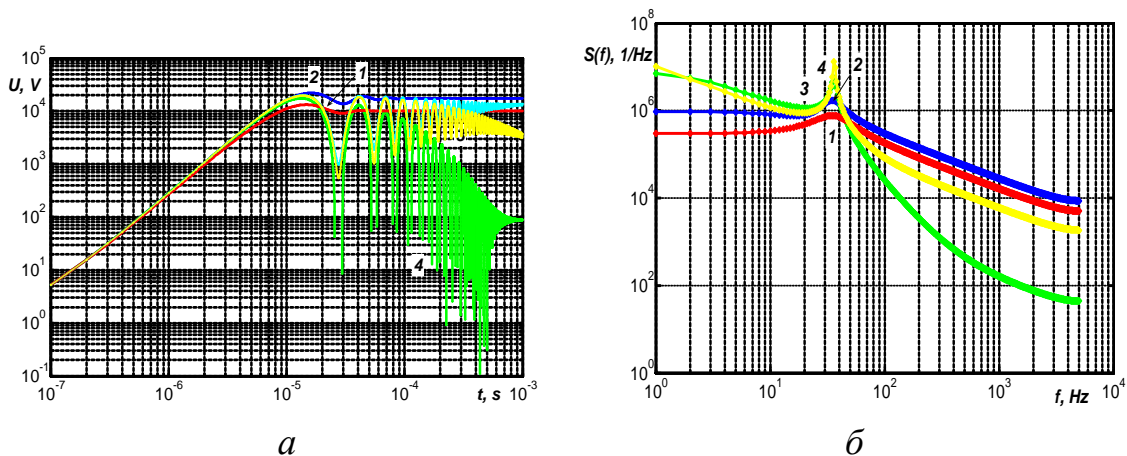


Рисунок 2 – Вплив імпедансів джерела напруги та навантаження на напругу в силовому однофазному кабелі в часовій (а) та частотній області (б)

Результати моделювання доводять, що при включенні кабелю в залежності від співвідношення значень імпедансів джерела напруги, навантаження та власне самого кабелю виникають перенапруги в кабельній лінії. Незалежно від співвідношення між значеннями імпедансів спектри напруги займають широкий діапазон частоти з найбільшим значенням спектральної функції напруги  $S(f)$  близько до промислової частоти.

Наявність спектральних складових напруги прискорює процеси старіння полімерної ізоляції, зокрема, до інтенсифікації зростання водяних трингів в товщі ізоляції [4]. За наявності негармонійності напруги джерела живлення це

може призвести до миттєвого розвитку електричних триінгів та пробою твердої полімерної ізоляції високовольтних кабелів [5].

**Список використаних джерел:**

1. Hammad A., Boshoff S., van der Merwe W. C., van Dyk C., Otto W., Kleynstüber U. H. E. SVC for Mitigating 50 Hz Resonance of a Long 400 kV AC Interconnection, ABB library. (2015)
2. Tarko R., Gajduca J., Nowak W., Szpura W. Study of the Lightning Overvoltage Protection Effectiveness of High Voltage Mixed Overhead Cable Power Lines. *Energies*, 2021, 14(8), 2329. <https://doi.org/10.3390/en14082329>.
3. International Council on Large Electric Systems, Working Group B1.60. TB 825. Maintenance of HV Cable Systems; CIGRE: Paris, France, 2021.
4. Беспрозванных А.В., Кессаев А.Г., Щерба А.А. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от степени увлажнения полиэтиленовой изоляции кабелей. – *Техническая электродинамика*, 2016, №3. <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.018>.
5. Bhutta M.S.; Yang L.J.; Ma Z.P.; Nazir M.T.; Akram S.; Mehmood M.A.; Faiz N. Simulation of thickness controlled DC breakdown of XLPE regulated by space charge & molecular chain movement. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2020, 27, 1143–1151. <https://doi.org/10.3390/polym13010040>.

УДК 621.316.11

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ПРИ КОМУТАЦІЇ ПРИЙМАЧІВ З ІМПУЛЬСНИМИ БЛОКАМИ ЖИВЛЕННЯ

Бодунов В.М., Безручко В.М., Приступа А.Л.

*Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна, м. Чернігів*

Низькі масогабаритні та вартісні показники а також висока енергетична ефективність імпульсних блоків живлення сприяли їх широкому використанню як в побутових так і в промислових приймачах електроенергії. Найбільшого поширення набули прості за конструкцією блоки живлення, де процес включення є стрімким та супроводжується появою значного струму та в окремих випадках перенапруги на конденсаторі [1, 2]. Імпульс струму при включенні таких приймачів може призводити навіть до некоректного спрацювання захисних апаратів. Саме моделюванню перехідних процесів при комутації приймачів з імпульсними блоками живлення присвячене дане дослідження.

Запропоновано імітаційну модель для дослідження процесу комутації до низьковольтної електричної мережі приймача з імпульсним блоком живлення на прикладі світлодіодного джерела світла (рис. 1).

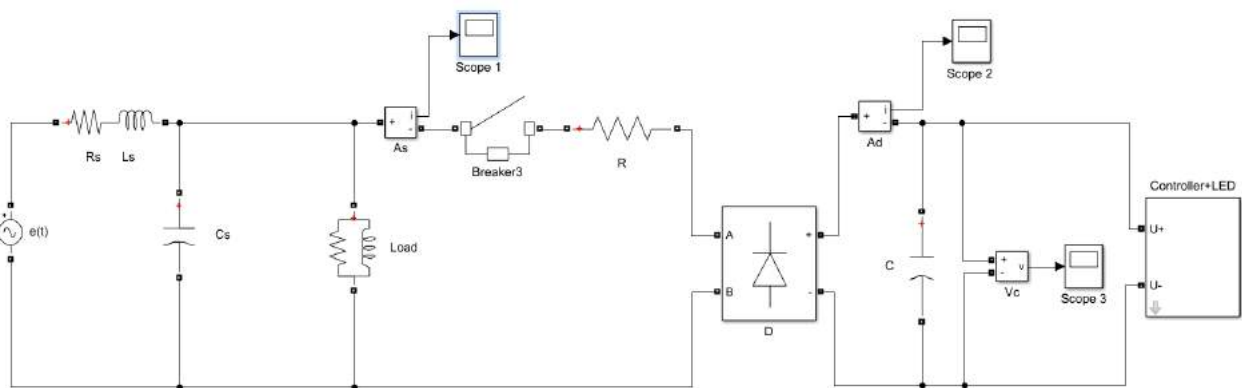


Рисунок 1 – Модель електричної мережі в Matlab Simulink

Модель створена в пакеті схемотехнічного моделювання Matlab Simulink [3] і дозволяє проводити моделювання перехідного процесу при включенні світлодіодної лампи або інших приймачів з імпульсними блоками живлення.

Низьковольтна електрична мережа представлена незмінним значенням синусоїдальної ерс  $e(t)$  та еквівалентним активно-індуктивним опором, що дорівнює опору петлі «фаза-нуль» (елементи  $R_S$  та  $L_S$  на рисунку 1), разом із цим, при моделюванні кабельних мереж, додатково враховується еквівалентна ємність кабельних ліній  $C_S$ . Інші приєднані до мережі навантаження задані у вигляді еквівалентної активно-індуктивної провідності (блок Load) [4, 5].

Модель світлодіодного джерела світла складається із шунтуючого резистора  $R$ , випрямляча (діодного мосту  $D$ ) та конденсатора  $C$ , драйвер із світлодіодами (блок Controller+LED) змодельовано із використанням стандартного елемента бібліотеки Simscape «Controlled Current Source» [3, 4], який споживає фіксований струм після досягнення порогового значення напруги на конденсаторі.

За допомогою створеної імітаційної моделі проведені дослідження зміни параметрів режиму для варіантів комутації при варіюванні параметрів низьковольтної мережі та самого імпульсного блоку живлення а також фази напруги в момент комутації.

Нижче наведено висновки за результатами імітаційного моделювання:

1) найбільший кидок струму та перенапругу на конденсаторі можна отримати при комутації із фазою напруги джерела  $90^\circ$ ;

2) на початковому етапі перехідного процесу, в інтервалі 0,2-2 мс, мають місце максимальні пікові значення струму та перенапруги, що дозволяє використовувати для аналізу перехідного процесу спрощені аналітичні моделі без урахування контролера;

3) збільшення кількості одночасно включених пиймачів призводить, окрім майже пропорційного зростання піку струму, до його зміщення та зростання тривалості перехідного процесу. В той же час зміна напруги на конденсаторі майже не залежить від кількості ламп.

4) наявність зовнішніх навантажень зменшує амплітуду перенапруги на конденсаторі, але, за рахунок шунтування конденсатора невеликим активним опором зовнішніх навантажень, може призводити до збільшення пікового значення струму, при цьому перехідний процес затухає швидше, ніж в за відсутності зовнішніх навантажень.

### Список використаних джерел:

1. Скопич Є.І. Дослідження режиму споживання нелінійними побутовими електроприймачами при змінній напрузі живлячої електромережі // Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі: Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів, 10 -11 квітня 2019 р.) : збірник тез доповідей. – Чернігів: Черніг. нац. технол. ун-т, 2019, с.131-133.

2. Горський В.В. Урахування потужності спотворень при аналізі електроспоживання однофазних електроприймачів // Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі: Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів, 10 -11 квітня 2019 р.) : збірник тез доповідей. -Чернігів: ЧНТУ, 2019 с.149-151.

3. Документація по програмному комплексу MATLAB. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://matlab.exponenta.ru/index.php>.

4. Power Electronics with MATLAB / L. Ashok Kumar, A. Kalaiarasi, Y. Uma Maheswari, Cambridge University Press, 2017 - 544 p.

5. Arrilaga J. Power systems electromagnetic transients simulation / Arrilaga J. – IET, London, 2007. – 449 p.

УДК 621.315.17

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ОПОР З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В УКРАЇНІ

Бондаренко Р.В., Довгалюк О.М., Яковенко І.С.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

На сьогоднішній день в багатьох країнах світу при вирішенні задач проектування та реконструкції електричних мереж активно застосовуються опори повітряні лінії електропередачі (ПЛ), виконані з композитних матеріалів. Найбільш інтенсивне використання таких опор відбувається в регіонах зі складними кліматичними і природними умовами експлуатації (сильні вітрові навантаження, велика ймовірність утворення ожеледе-паморозевих відкладень), а також у важкодоступній місцевості (при проходженні трас ПЛ по гірським і болотистим територіям, лісовим масивам і т.д.). Для електричних мереж України, більшість обладнання яких експлуатується із значним перевищенням нормативного терміну служби (рис. 1), питання модернізації і реконструкції постають досить гостро [1]. У деяких випадках замінювати опору ПЛ на ідентичну не має економічного сенсу, оскільки необхідно міняти як стійки опори, так і фундамент. В цих випадках доцільно розглядати варіанти застосування сучасного обладнання, в тому числі й опор з композитних матеріалів. Виходячи з цього, дослідження особливостей властивостей та техніко-економічних характеристик опор з композитних матеріалів та їх врахування при проектуванні електричних мереж є актуальним завданням для енергетики України.

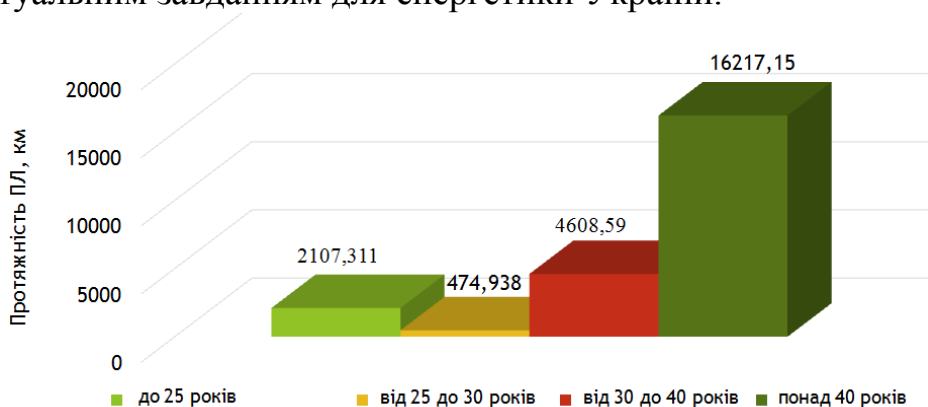


Рисунок 1 – Термін служби ПЛ в енергосистемі України станом на 2021 р.

Для вирішення поставленої задачі були проаналізовані основні хімічні, механічні та ізоляційні властивості різних композитних матеріалів, які частіше використовуються при виготовленні опор для високовольтних ПЛ. Також виконано дослідження щодо найбільш поширених типових конструкцій опор ПЛ із композитних матеріалів, які застосовуються в електричних мережах різних класів напруги

США, Канади, Китаю, Австралії та Туреччини, серед яких виділені найбільш доцільні для застосування в Україні [2]. Для вибраних типів опор різної конструкції були виконані розрахунки механічних та технічних характеристик, проведений розрахунок оптимальних габаритів цих опор та їх гранично допустимих відхилень під час деформацій в результаті різних впливів при експлуатації ПЛ. Приклад такого розрахунку для опори PRS на 110 кВ представлений на рис. 2.

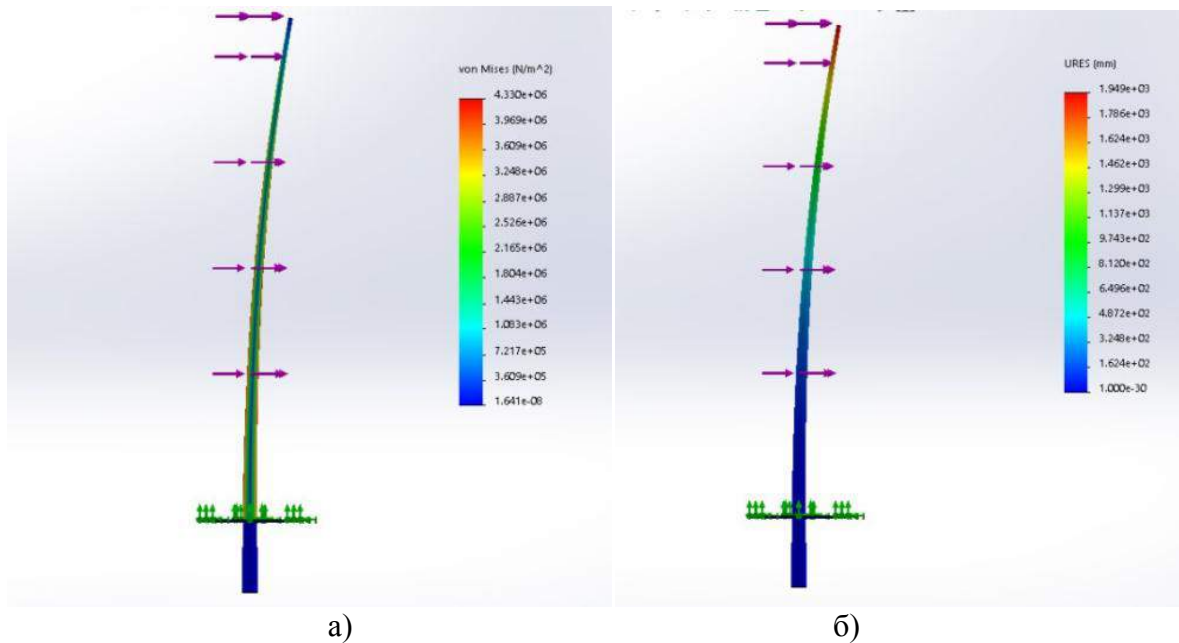


Рисунок 2 – Результати розрахунку механічних характеристик для опори PRS 110-1.170-275-071: а) еюра напруг; б) еюра деформацій опори

Аналіз результатів розрахунку показав, що у порівнянні із залізобетонними та металевими опорами досліджувані опори з композитних матеріалів мають кращі механічні характеристики, більш високу гнучкість до руйнування або залишкової деформації, а також більші значення відхилень для стійок та траверс, що впливає на ширину коридору ПЛ та потребує врахування в нормативних проектних документах.

Таким чином, застосування композитних матеріалів для створення стійок та траверс опор дозволяє розробляти нові конструкції опор ПЛ, що характеризуються оптимальними габаритами у розрахункових умовах експлуатації, і в той же час потребує підготовки нормативної бази з проектування та експлуатації таких опор.

### Список використаних джерел:

1. Національна енергетична компанія "Укренерго". [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://ua.energy/about/merezhi-ukrenergo/>.
2. Dovgalyuk O., Bondarenko R., Miroshnyk K., Yakovenko I., Dyakov E., Syromyatnikova T. Features Analysis of Composite Supports Application for Electric Power Networks in Ukraine / 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2020, pp. 103-108, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250150.

УДК 621.315.62

## УТОЧНЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ЛІНІЙНОГО ІЗОЛЯТОРА З ЗАБРУДНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Борзенков І.І.<sup>1</sup>, Шевченко С.Ю.<sup>1</sup>, Данильченко Д.О.<sup>1</sup>,  
Лебединський І.Л.<sup>2</sup>, Загородня Т.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків

<sup>2</sup> Сумський державний університет, Україна, м. Суми

Якщо розглядати схему заміщення одного ізолятора з забрудненою поверхнею без урахування паразитних ємностей то вона має вигляд, як представлено на рис. 1.

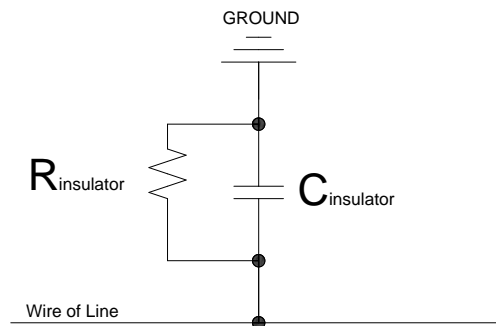


Рисунок 1 – Схема заміщення одного ізолятора без врахування паразитних ємностей

З рис. 1  $C_{\text{insulator}}$  – власна ємність ізолятора, яка лежить в діапазоні 40 – 70 пФ [1],  $R_{\text{insulator}}$  – опір забруднення поверхні ізолятора відповідно.

Для уточнення і порівняння з [1] параметру  $C_{\text{insulator}}$  схеми заміщення рис. 1 було проведено ряд експериментів з визначення ємності об'єкту за допомогою вимірювального комплексу Вектор 2М. Вимірювальний комплекс Вектор 2М являє собою багатофункціональний вимірювальний комплекс, зокрема вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ізоляційних конструкцій. Принцип вимірювання базується на схемі вимірювального моста Шерінга рис. 2.

З рис. 2  $C_1$  – досліджуваний конденсатор,  $R_1$  – послідовний опір в еквівалентній схемі досліджуваного конденсатора,  $C_2$  – еталонний конденсатор,  $R_3$  – без індукційний резистор,  $C_4$  – змінний конденсатор,  $R_4$  – змінний без індукційний резистор, включений паралельно з  $C_4$ .

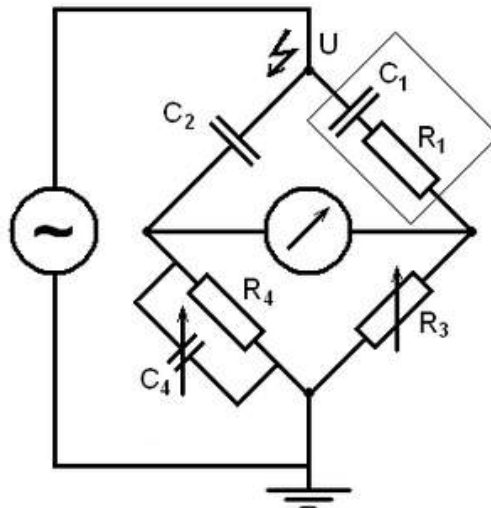


Рисунок 2 – Схема моста Шерінга

В якості об’єктів дослідження були лінійні тарілчасті ізолятори типів: ПС-6Б, ПС-120Б, ПСД-70Е, у яких ізолюючі поверхні попередньо були забруднені розчином каоліну, що відповідає II зоні забрудненості атмосфери. Випробування були проведені для двох станів поверхонь ізоляторів: 1) суха забруднена поверхня, 2) зволожена забруднена поверхня. Зволоженню піддавалась тільки верхня частина тарілки ізоляторів. Результати експериментів зведені до табл. 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювання ємності  $C_{insulator}$  ізоляторів типу: ПС-6Б, ПС-120Б, ПСД-70Е

Тип ізолятора	$C_{insulator}$ , пФ	
	суха забруднена поверхня	зволожена забруднена поверхня
ПС – 6Б	93,52	100,71
ПС – 120Б	119,46	124,7
ПСД – 70Е	114,74	167,31

Як видно з табл. 1 власна ємність ізолятора  $C_{insulator}$  має відмінні параметри з наведеними в [1]. Також з табл. 1 видно, що власна ємність ізолятора змінюється з станом поверхні ізолятора. Цей параметр суттєво впливає на величину розподілу напруги вздовж гірлянди ізоляторів, за розрахунків при проектуванні повітряних ліній електропередавання.

#### Список використаних джерел:

1. Нечитаев Р. А. Потери энергии в конструктивных элементах воздушных линий электропередачи и разработка мер по их снижению : дис. канд. техн. наук : 05.14.02. – Новосибирск: НГТУ, 2018. – 131 с.

УДК 621.311.25

**ПЕРСПЕКТИВИ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ  
ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЗАЛІЗНИЦІ****Босий Д.О., Земський Д.Р.***Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна, Україна, м. Дніпро*

Сьогодення сучасної енергетики обумовлюється зростаючим обсягом електроенергії отриманої від відновлюваних джерел. В основі цього процесу є необхідність вирішення екологічних проблем, охорони довкілля і складнощі енергетичної політики у світі, обумовленої, серед іншого, і зростаючим попитом на електроенергію.

Наприклад, у період 1998 – 2018 рр. світове споживання енергії збільшилось на 4 500 млн. т нафтового еквіваленту (н.е.), та у 2018 році становить близько 13 500 млн. т н.е. Найбільший стрибок у попиті на енергію відбувся у державах азійського регіону, з 2 700 до 5 700 млн. т н.е.. У порівнянні країни Європи та Північної Америки у продовж 2018 р витратили 4 346 млн. т н.е., а приріст споживання за аналогічний період складає 139 млн. т н.е. У зв'язку із розвитком науки та техніки значення електроенергії у світі зросло, що проявилось у збільшенні її виробництва на 97 % за останні 20 років. Прогнозується, що попит на електроенергію досягне відмітки у 35,5 тисяч ТВт на годину в 2040 році, що на 60 % більше показників 2017 року; у зростанні попиту на енергію серед кінцевих споживачів часка електроенергії складатиме 40 %.

Нині альтернативні джерела електроенергії нестримно розвиваються, збільшується кількість постачальників і змінюються умови надання послуг з електропостачання. Україна за останні роки досягла значного прогресу в розвитку джерел альтернативної електричної енергії, зокрема, сонячних (СЕС) і вітрових (ВЕС) електростанцій. За рік об'єктами відновлюваної енергетики, яким видано «зелений» тариф, вироблено близько 5000 млн кВт·год електроенергії. З них близько 50 % електроенергії виробляється сонячними електростанціями. Загалом у структурі виробництва електроенергії на у залежності від сезону та часу доби частка відновлювальних джерел коливається від 1 до 9 %.

Сферами застосування джерел розподіленої генерації на залізничному транспорті, як слідує з аналізу наукових публікацій, можуть бути наступні напрями: об'єкти залізничного транспорту в регіонах з нестійким електропостачанням; створення транспортно-енергетичних коридорів, що поєднують траси залізниць і автомобільних доріг, високовольтні лінії електропередачі і лінії зв'язку; підвищення якості електроенергії; живлення автономних об'єктів інфраструктури залізничного транспорту з використанням нетрадиційних поновлюваних джерел енергії.

Українські залізниці постачають електроенергію не тільки своїм структурним підрозділам, але й іншим споживачам. Приватні будинки, індивідуальні підприємці та невеликі виробничі потужності, розташовані біля залізниці, живляться від її мереж. До реформи ринку електроенергії Укрзалізниця виконувала функції із постачання і розподілу електроенергії, а після реформи створило компанію ТОВ «Енерго Збут Транс», яка постачає електроенергію Укрзалізниці та більше ніж 400 підприємствам по всій території України.

У зв'язку з цим для Укрзалізниці є перспективним використання сонячної генерації. На нашу думку верхня частина будівель, вокзалів, депо, тощо може бути використана для встановлення відповідного обладнання та задіяна як для покриття власних потреб УЗ та і для продажу до ТОВ «Енерго Збут Транс» та інших постачальників електроенергії з відповідною реалізацією електроенергії.

Відповідно перспектива реалізації цього проекту потребує ретельного наукового вивчення та інженерних вишукувань.

УДК 621.311

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОБЛОКОМ В НЕШТАТНИХ РЕЖИМАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ****Буданов П.Ф., Бровко К.Ю., Кирисов І.Г., Хом'як Е.А.***Українська інженерно-педагогічна академія, Україна, м. Харків*

У зв'язку з безперервним підвищенням рівня автоматизації енергоблоків, питання ефективності експлуатованих і модернізованих АСУТП набувають все більшого актуального значення. Це обумовлено перш за все тим, що на апаратно-програмні та технічні засоби АСУТП витрачаються значні суми, а їх обслуговування та ремонтно-відновлювальні роботи вимагають великих витрат оперативного персоналу ТЕС і АЕС. В даний час на електростанціях практично не проводилися дослідження залежності одержуваної ефективності від підвищення рівня автоматизації управління технологічним обладнанням в нештатних аварійних режимах функціонування енергоблоку [1].

Основними причинами є те, що в існуючих методиках, в якості джерела ефективності АСУТП, приймають тільки статистичні дані без урахування динаміки зміни процесу управління. Такий підхід не дозволяє в розрахунках ефективності враховувати динаміку зміни характеристик параметрів технологічного процесу, особливо при відхиленні їх від норми, в нештатних режимах функціонування енергоблоків ТЕС і АЕС.

Як відомо [2], джерела ефективності, характер і ступінь впливу АСУТП на режим управління в нештатних ситуаціях, залежать від функціональних, алгоритмічних, програмних і технічних рішень. Однак, у зв'язку зі специфічними особливостями роботи АСУТП в нештатних режимах роботи енергоблоку, доводиться враховувати не конкретну ефективність управління, а її функцію від часу, характер і ступінь достовірності інформації [3]. Це висуває нові додаткові вимоги до забезпечення порівнянності розрахунків ефективності керування з урахуванням критеріїв достовірності інформації про технологічні параметри в нештатних режимах роботи енергоблоку. За оцінками багатьох фахівців [4], автоматизація визначення та аналізу показників ефективного управління, обумовлена можливістю отримання достовірної та об'єктивної інформації про параметри технологічного процесу енергоблоку, в режимі реального часу.

В роботі [5], були проведені дослідження відхилення технологічних параметрів від норми, засновані на зміні електрофізичних параметрів інформаційних сигналів, які несуть аварійні ознаки. Однак отримання тільки часового критерію оцінки аварійних ознак про технологічні параметри, без врахування впливу ступеня достовірності інформації, не дає об'єктивної оцінки про ефективність управління енергоблоку в режимі реального часу.

Тому, своєчасна оцінка інформації про технологічні параметри, тобто ступінь її достовірності, може істотно вплинути на режими роботи енергоблоку (наприклад: останов і зниження навантаження енергоблоку). Крім того, інформація з низьким ступенем достовірності може привести до спотворення сигнала

лів управління і сформувати помилкові спрацьовування виконавчих механізмів, пристроїв блокувань (захистів) і перевести енергоблок в несанкціонований режим роботи.

При розробці структури АСУТП енергоблоку у нештатних режимах функціонування, характерною особливістю є контроль параметрів технологічного процесу в режимі реального часу з урахуванням критерію оптимальності управління. В роботі запропоновано структуру АСУТП, де частково інформація обробляється у центральному керуючому пристрої, а частково з датчиків контролю передається безпосередньо на логічні та аналогові автомати, пристрої технологічного захисту. Несанкціонований останов і наступний повторний пуск енергоблоку може проводитися через помилкові спрацьовування блокувань і захистів. Тому в структурних схемах АСУТП для штатних режимів необхідно додатково включати структурні елементи у вигляді окремих модулів для перевірки інформації на ступінь достовірності. Також, необхідно контролювати відхилення параметрів технологічного процесу від норми в нестационарних нештатних режимах. У зв'язку з цим, було запропоновано виконувати завдання автоматизованого управління енергоблоком в нештатних режимах на основі штатної схеми АСУТП з використанням додаткового модульного блоку режиму нештатних ситуацій (МБ РПШС). Даний модуль МБ РПШС дозволить забезпечити ефективне управління енергоблоком на основі удосконалення програмно-технічних засобів і математичних моделей для випадкових експлуатаційних змін, що реалізуються в режимі реального часу.

Таким чином, актуальність обраного напрямку дослідження, полягає у вивченні процесів впливу інформації з низьким ступенем достовірності про технологічні параметри на ефективність автоматизованого управління в нештатних режимах роботи енергоблоку електростанції.

### Список використаних джерел:

1. Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Бібіков О. О., Федченко-Галаган Є. С. Методика виявлення помилкових спрацьовувань у нештатних режимах функціонування енергооб'єкта // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Вип. 204 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2019. – С. 53–55.
2. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Vasyuchenko P., Khomenko V. Improving The Reliability Of Information-Control systems At Power Generation Facilities Based on The Fractal-Cluster Theory // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2/9(92). – 2018. – P. 4–12.
3. Буданов П. Ф., Бровко К. Ю. Моделювання ознак аварійності параметрів технологічного процесу об'єктів електроенергетики // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Харків : Харків. ун-т Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2015. – Вип. 2(43). – С. 84-88.
4. Popov O., Shmatko N., Budanov P., Pantieliieva I., Brovko K. Cost-effectiveness in mathematical modelling of the power unit control // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 6/3(102). – 2019. – P. 20–28.
5. Буданов П. Ф., Бровко К. Ю. Метод фрактального обнаружения аварийных признаков в информационном пространстве технологического процесса // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 4(44). – С. 56-60.

УДК 629.7.064.5

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ШАРУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

**Буданов П.Ф., Кирисов І.Г.**

*Українська інженерно-педагогічна академія, Україна, м. Харків*

Останнім часом в Україні дуже активно розвивається сонячна енергетика. На теперішній час в Україні налічується 875 промислових СЕС та майже 30000 домогосподарств в яких встановлено сонячні батареї. На сьогодні найбільш поширені сонячні батареї на основі моно- і полікристалічного кремнію, на долю яких доводиться 80% світового ринку виробництва сонячних батарей.

Термін експлуатації сонячних батарей, який встановлює виробник, складає 20-25 років. Як показує практика експлуатації, вже через 2 роки у сонячних батареях починають знижуватися вихідна потужність від 10 до 40% і як наслідок знижується ККД. Зниження вихідної потужності відбувається через дії певних факторів, які впливають на сонячні батареї під час виробництва і експлуатації.

До основних факторів, які впливають на продуктивність та термін роботи сонячної батареї відносяться:

1. якість та матеріал виготовлення фотоелектричного модуля;
2. якість герметизації панелі захисною плівкою;
3. правильність встановлення фотоелектричного модуля відносно оптимального кута потрапляння сонячних променів;
4. вплив погодних умов (підвищена вологість і температура, їх коливання);
5. випадкові механічні пошкодження.

Основним елементом сонячної батареї в якому відбувається перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію є фотоелектричний перетворювач.

При дії на поверхню фотоелектричний перетворювача зовнішніх і внутрішніх чинників, відбуваються фізичні процеси, які призводять до утворення дефектів у виді: локальних неоднорідностей, мікропор, мікро і макротріщин.

Для виявлення дефектів на етапі виробництва та в процесі експлуатації, запропоновано використати підхід, щодо розрахунку величини площі активної сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, на основі використання апарату фрактальної геометрії.

### Список використаних джерел:

1.Буджак Я.С., Єрохов В.Ю., Мельник І.І. Прогнозування і розрахунок фотоелектричного перетворювача із заданими характеристиками// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011.– № 4/8(52). – С. 24-29.

2.Шарифов Б.Н., Терегулов Т.Р. Моделирование солнечной панели в программе MATLAB/SIMULINK // Весник УГАТУ . – 2015.– Т.19.– № 4(70),– С. 77–83.

УДК 621.3.015:621.314.222

## АНАЛІЗ ХАРАКТЕРУ ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРУГИ

Ганус О.І., Старков К.О.

АТ «Харківобленерго», Україна, м. Харків

Електричні мережі (ЕМ) різних номінальних напруг є основними засобами для передачі та розподілу електричної енергії споживачам. Суттєвою особливістю їх експлуатації для надійності електропостачання та забезпечення якості електричної енергії є пошкоджуваність окремих елементів ЕМ, зокрема вимірювальних трансформаторів напруги (ТН). Вирішення проблеми усунення впливу ферорезонансних процесів на надійність роботи вимірювальних ТН потребує наявності достовірної математичної моделі спільної роботи ТН з ЕМ.

Для вирішення поставленої задачі виконаний аналіз перехідних процесів, що відбуваються в ЕМ з ТН, на основі чого були вдосконалені математичні моделі параметрів режиму ЕМ для електромагнітних перехідних процесів, запропоновані в [2] та [3]. Подальше ускладнення системи математичних виразів проводилось шляхом врахування факторів, пов'язаних з наявністю у системі нелінійних елементів, з метою розробки рекомендацій щодо підвищення надійності роботи ТН та попередження ферорезонансних процесів (ФРП) на підставі виконаних досліджень. В результаті розроблено математичні моделі вільної і вимушеної складових струмів перехідних процесів та напруг на елементах ЕМ з ТН в усьому можливому діапазоні їх зміни. Схема для дослідження перехідних процесів в ЕМ з ТН представлена на рис. 1.

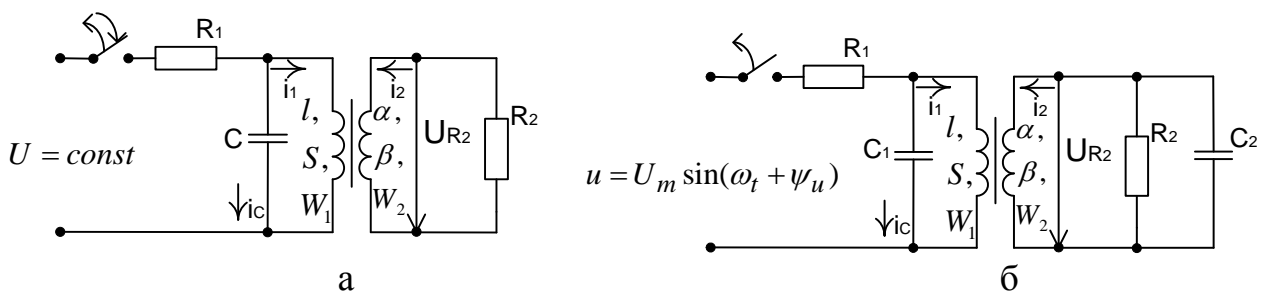


Рисунок 1 – Схема для дослідження перехідних процесів в ЕМ з ТН:

а – при відключенні/підключенні ТН до джерела постійної напруги;

б – при відключенні/підключенні ТН від/до джерела синусоїдальної напруги

Встановлено, що кратність перенапруг зменшується зі збільшенням ємності. Але на кратність перенапруги, що виникає на первинній обмотці ТН, впливає як опір вторинної обмотки, так і момент розмикання ключа. Причому результати експериментів показали, що замкнута вторинна обмотка погіршує

процес відключення нелінійної індуктивності ТН, оскільки перенапруги при цьому зростають. Однак доведено, що при розімкнутій вторинній обмотці (що характерно для нормальної роботи ТН), тривалість перехідного процесу значно зростає. При зниженні частоти коливань збільшуються струми в первинній обмотці, що небезпечно з точки зору термічної стійкості ізоляції обмотки. Отже, аналіз одержаних математичних залежностей показав, що при збільшенні ємності ЕМ тривалість загасання перехідного процесу збільшується, а частота і кратність перенапруг зменшуються.

Продемонстровано, що навіть невеликі, порівняно з первинною номінальною синусоїдальною напругою, аперіодичні складові перехідного процесу напруги можуть призвести до значних перенапруг на обмотках ТН при його відключенні. Обґрунтовано, що на кратність перенапруг, що виникають на первинній обмотці ТН, впливає як опір вторинної обмотки, так і момент комутації. Також обґрунтовано, що замкнута вторинна обмотка погіршує процес відключення нелінійної індуктивності ТН. Визначено величини, до рівня яких при цьому зростають перенапруги.

Показано, що при розімкнутій вторинній обмотці тривалість перехідного процесу значно зростає. Виявлено, що зниження частоти коливань перехідного процесу у ЕМ з ТН супроводжується збільшенням струму у первинній обмотці ТН. Зазначене є небезпечним з точки зору термічної стійкості ізоляції обмотки ТН.

Продемонстровано, що замикання вторинної обмотки ТН призводить до значного скорочення часу загасання перехідного процесу. Обґрунтовано те, що незважаючи на можливість незначного збільшення кратності напруги, даний процес можна використовувати для забезпечення примусового зриву (придушення) ФРП.

Розглянута ефективність існуючих заходів щодо зриву ФРП (короткочасне шунтування вторинної обмотки ТН). Визначено співвідношення параметрів ЕМ (ємність секцій шини обладнання, нелінійність характеристик ТН, момент відключення тощо), при яких може наступати ФРП і врахування яких повинно дозволити, з точки зору попередження ФРП, визначити елементи ЕМ, які вимагають більш детальних досліджень.

### Список використаних джерел:

1. Ганус А.И., Старков К.А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по её снижению / Світлотехніка та електроенергетика. – 2003. – № 1. – С. 75–81.
2. Тугай Ю.І., Ганус О.І., Старков К.О. Комутаційні перенапруги у трансформаторах напруги / Технічна електродинаміка. – 2016. – № 5. – С. 73–75.
3. Ганус О.І., Старков К.О., Черкашина В.В. Складові перенапруг на елементах схеми заміщення трансформатора напруги / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика, надійність та енергоефективність. – 2019. – № 29 (1354). – С. 41–46.

УДК 621.311:628.9

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ОСВІТЛЕННЯ МІСТ

Говоров П.П., Кіндінова А.К., Іванкова І.Г.

*Харківський Національний університет міського господарства імені  
О.М. Бекетова, Україна, м. Харків*

Як відомо, сталий розвиток міст, в значній мірі визначає рівень їх інформаційного, технічного, екологічного, соціально-економічного та енергетичного забезпечення. У структурі міст і населених пунктів можна виділити ряд взаємопов'язаних і взаємодіючих систем: екологічну, економічну, соціальну, технічну (підсистеми транспорту, тепло-, водо-, газо-, електропостачання, освітлення і т.д.). При цьому, енергія становить основу дії всіх зазначених систем. Цілком зрозуміло, що стан ефективності енергозабезпечення міст визначає рівень їх соціально-економічного та екологічного стану. Тому, з упевненістю, можна стверджувати, що одним з найважливіших завдань сталого функціонування міст є забезпечення умов для раціонального використання їх енергетичних ресурсів. Причому це відноситься, як до економічної, так і до соціальної, і екологічної складових ефективності, інформаційного та ресурсного забезпечення процесів.

У представленій роботі сукупність технічних засобів (машин, механізмів і забезпечують їх роботу пристроїв) з урахуванням їх призначення, цілісності структури і великого рівня розмірності представлена як технічний мегакомплекс, який в сукупності з навколишнього людини середовищем утворює його техносферу. У поєднанні з соціальної, економічної та біологічної системами вона утворює екологічну сферу людини, яка забезпечує відповідні умови його життя.

У своїй сукупності людей, біосфера і техносфера утворюють екосфери і всі разом вони утворюють замкнену систему життєзабезпечення міста. У цих умовах проявляється особливість технічних засобів, яка полягає в тому, що вони не тільки виникають завдяки людині, а й одночасно отримувати прямий або побічно впливають на умови його життя та його стан.

У відомих роботах, присвячених даного питання, умови сталого розвитку територій розглядаються спрощено в рамках соціально-економічних наслідків. Облік технічних факторів і взаємний вплив його складових в роботах не розглядалося. Тому в роботі розглянуті наукові основи забезпечення процесу сталого розвитку міст з урахуванням економічної, соціальної та екологічної складових ефективності, на основі застосування методу експертних оцінок та ранжування факторів, що визначають її, що становить науковий і практичний інтерес. Отримана на їх основі форма критеріальною функції, забезпечує виявлення

умови оптимального функціонування територіальних утворень, як єдиного цілого з урахуванням економічних, екологічних і соціальних наслідків.

**Список використаних джерел:**

1. Говоров Ф.П. (2001) Докторская диссертация «Управление режимами распределительных электрических сетей городов на основе гибких систем».
2. Михайлов В.В., Тарнижевский М.В., Тименко В.Ф. (1993) Режимы коммунально-бытового электропотребления. – Энергоатомиздат. – 288 с.
3. Лежнюк П.Д., Кулик В.В. (2004) Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 188 с.
4. Дитрих Я. (1981) Проектирование и конструирование. Системный подход. Мир. – 456 с.
5. Говоров Ф.П. (1997) К вопросу об оптимизации регулирования напряжения в городских электрических сетях. Промышленная энергетика. – №7. – С. 21–25.

УДК 621.315.211.9

**НОВІТНІ КОНЦЕПЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ В СИЛОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЯХ****Гринишина М.В.***Завод «Інтеркабель Київ», Україна, м. Київ*

Альтернативою зшитій поліетиленовій ізоляції (XLPE) є застосування високопродуктивних термопластичних еластомерів (ВПТЕ) для ізоляції силових кабелів, зокрема, на основі поліпропілену. ВПТЕ – це нова концепція застосування кабельних термопластичних композицій з відповідною технологією, розроблена в 2010 року спочатку для кабелів середньої та високої змінної напруги [1]. В наступний час доступні комерційні високовольтні силові кабельні системи не тільки змінного струму, але і постійного струму (HVDC) з термопластичною ізоляцією на основі поліпропілену [1]. Так, до 2026 року фірма Prysmian – один із лідерів у виробництві кабельно-провідникової продукції, – поставить підземну кабельну систему HVDC довжиною 250 км на напругу  $\pm 525$  кВ потужністю 2 ГВт, в якій застосовуються кабелі на основі ВПТЕ з власною розробленою інноваційною технологією ізоляції P-Laser [1].

Поліпропілен є одним із термопластів, які підлягають переробці та легко переробляються. Наявність метильної групи ( $\text{CH}_3$ ) в структурі поліпропілену  $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-]_n$  забезпечує високі електричні, механічні та теплові характеристики. Змішування ізотактичного поліпропілену (іPP), який має високу температуру плавлення  $170^\circ\text{C}$ , але є занадто жорстким і має нижчу електричну міцність (рис. 1), ніж у зшитого поліетилену, що унеможливило безпосереднє застосування в системі ізоляції високовольтних кабелів, із сополімерами етилену забезпечує компроміс між механічними та електричними властивостями такої кабельної композиції (рис. 1).

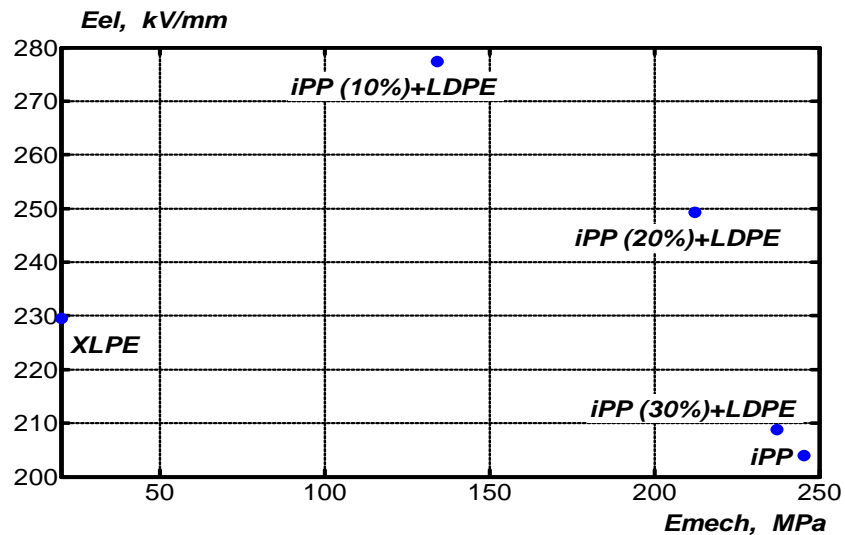


Рисунок 1 – Кореляційна залежність між модулем пружності та електричною міцністю в залежності від вмісту поліетилену низької густини композицій на основі ізотактичного поліпропілену

### Список використаних джерел:

1. Prysmian secures approx. €500M SuedOstLink cable corridor project in Germany. Prysmian Group: Milan, Italy, 2020.
2. Huang, X.; Zhang, J.; Jiang, P.; Tanaka, T., Material progress toward recyclable insulation of power cables part 2: Polypropylene-based thermoplastic materials. IEEE Electr. Insul. Mag. 2020, 36, 8-18. DOI:10.1109/MEI.2020.8932973.
3. DuB. (Ed.) Polymer Insulation Applied for HVDC Transmission. – Handbook. - Springer: Singapore, 2021. – 674 p.

УДК 621.311

**ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО МІСЦЯ ВСТАНОВЛЕННЯ  
СЕКЦІОНАЛІЗЕРІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 6-10 КВ****Діхтярук І.В., Буйний Р.О.***Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна, м. Чернігів*

**Вступ.** Найбільша кількість аварійних відключень відбувається в діючих розподільних електричних мережах (ЕМ) напругою 6-10 кВ з повітряними лініями електропередавання, які мають сильнорозгалужену деревоподібну структуру. Одним із найменш витратних та ефективних шляхів підвищення надійності електропостачання споживачів, що отримують живлення від таких мереж, є секціонування мережі секціоналізаторами – комутаційними апаратами (КА), які можуть відключатися під час безструмової паузи.

**Основні матеріали дослідження.** Для підвищення ефективності роботи розподільних ЕМ напругою 6-10 кВ в [1] запропоновано застосувати автоматичне реконфігурування їх структури за допомогою секціоналізаторів, а в [2] показано, що найефективнішим є секціонування магістралі ЕМ одним або двома КА.

Для типових структур ЕМ напругою 6-10 кВ [3] методом прямого перебору визначено раціональні місця встановлення одного та двох секціоналізаторів для ЕМ без резерву, з ручним та автоматичним резервом. При цьому за критерій раціональності прийнято величину найбільшого зниження недовідпуску електричної енергії споживачам.

Аналіз отриманих результатів вказує на те, що у більшості випадків отримана множина раціональних місць встановлення двох КА включає в себе 70-100% раціональних місць встановлення одного КА. Таким чином встановлено, що виконувати розрахунки для варіантів секціонування ЕМ одним КА є недоцільно.

Вирішенню подібної проблеми присвячено багато робіт, зокрема в [4] розглядається стратегія розміщення автоматизованих та дистанційно керованих вимикачів у розподільних ЕМ та визначенні їх кількості урахуванням інвестиційних та експлуатаційних витрат. Проте, більшість робіт передбачає створення індивідуальних алгоритмів для кожної структури ЕМ.

Для спрощення розв'язку задачі оптимізації та її адаптації для будь-якої структури ЕМ в [5] запропоновано представляти структуру ЕМ розподілом потужності вздовж її довжини, що дозволило отримати цільові функції відносного недовідпуску електричної енергії споживачам для ЕМ без резерву, з ручним та автоматичним резервом, секціонованих одним та двома КА. Так, для випадку двох секціоналізаторів в ЕМ без резерву, з ручним та автоматичним резервом цільові функції будуть мати вигляд:

$$\Delta W_{\Sigma}^{2KA} = \Delta W_{\Sigma}^{\max} \cdot \left[ L_{1\Sigma}^* + (1 - P_{1\Sigma}^*) \cdot (1 - L_{1\Sigma}^* - L_{3\Sigma}^*) \cdot \frac{\Delta_1''}{\Delta_1} + P_{3\Sigma}^* \cdot L_{3\Sigma}^* \cdot \frac{\Delta_1'}{\Delta_1} \right]; \quad (1)$$

$$\Delta W_{\Sigma}^{2KA} = \Delta W_{\Sigma}^{\max} \cdot \left[ P_{1\Sigma}^* \cdot L_{1\Sigma}^* + (1 - P_{1\Sigma}^*) \cdot L_{1\Sigma}^* \cdot \frac{\Delta_1^{PДЖ}}{\Delta_1} + (1 - P_{1\Sigma}^* - P_{3\Sigma}^*) \cdot (1 - L_{1\Sigma}^* - L_{3\Sigma}^*) \cdot \frac{\Delta_1''}{\Delta_1} + P_{3\Sigma}^* \cdot (1 - L_{1\Sigma}^* - L_{3\Sigma}^*) \cdot \frac{\Delta_1^{nPДЖ}}{\Delta_1} + P_{3\Sigma}^* \cdot L_{3\Sigma}^* \cdot \frac{\Delta_1'}{\Delta_1} \right]; \quad (2)$$

$$\Delta W_{\Sigma}^{2KA} = \Delta W_{\Sigma}^{\max} \cdot \left[ P_{1\Sigma}^* \cdot L_{1\Sigma}^* + P_{3\Sigma}^* \cdot L_{3\Sigma}^* + (L_{1\Sigma}^* - P_{1\Sigma}^* \cdot L_{1\Sigma}^* - P_{3\Sigma}^* \cdot L_{1\Sigma}^*) \cdot \frac{\Delta_1^{PДЖ}}{\Delta_1} + (1 - L_{1\Sigma}^* - L_{3\Sigma}^*) \cdot (1 - P_{1\Sigma}^* - P_{3\Sigma}^*) \cdot \frac{\Delta_1''}{\Delta_1} \right]; \quad (3)$$

де  $P_{1\Sigma}^*$ ,  $P_{3\Sigma}^*$ ,  $L_{1\Sigma}^*$ ,  $L_{3\Sigma}^*$  – потужності споживачів та сумарні довжини ділянок у в.о. у першій та третій зонах, що утворюються у мережі в результаті її секціонування двома КА;  $\Delta_1$ ,  $\Delta_1^{PДЖ}$ ,  $\Delta_1'$ ,  $\Delta_1''$  – середні тривалості відновлення електропостачання споживачам в цілому по нерезервованій ЕМ та мережі з резервним джерелом живлення при стійких пошкодженнях, та для зон, які відділяються після першого та другого циклів АПВ відповідно (віднесені до 1 км довжини лінії);  $\Delta W_{\Sigma}^{\max}$  – недо-відпуск електричної енергії споживачам вихідної електричної мережі без КА.

З (1)-(3) видно, що цільові функції залежать від декількох змінних:  $P_{1\Sigma}^*$ ,  $P_{3\Sigma}^*$ ,  $L_{1\Sigma}^*$ ,  $L_{3\Sigma}^*$ . Розв'язуючи рівняння (1)-(3) відносно цих змінних можна знайти мінімум цільової функції:  $\Delta W_{\Sigma}^{2KA} \rightarrow \min$ , якому будуть відповідати значення  $P_{i\Sigma}^*$  та  $L_{i\Sigma}^*$  у оптимальних місцях встановлення секціоналайзерів.

### Список використаних джерел:

1. Діхтярук І. В. Автоматичне секціонування розподільних електричних мереж напру-гою 6–10 кВ із застосуванням роз'єднувачів нового покоління / Р.О. Буйний, І.В. Діхтярук, В.В. Зорін // Технічна електродинаміка – 2014. – № 3. – С. 70–75.
2. Буйний Р.О. Методичні рекомендації з побудови схем секціонування розподільних електричних мереж напругою 6-10кВ / Р.О. Буйний, В.В. Зорін, А.О. Квицинський // Элект-рические сети и системы. – 2015. – №6. – С22–32.
3. Гомельський Д.К. Кластеризація структур розподільних електричних мереж напру-гою 10 кВ / Д.К. Гомельський, Р.О. Буйний, А.О. Квицинський // Енергетика та електрифіка-ція. – 2014. – №4. – С. 34–37.
4. Abiri-Jahromi A., Fotuhi-Firuzabad M., Parvania M., Mosleh M. Optimized Sectionalizing Switch Placement Strategy in Distribution Systems IEEE Transactions on Power Delivery Vo-lume: 27, Issue: 1, Jan. 2012, pp. 362-370. – DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2171060.
5. Буйний Р.О. Врахування розподілу потужності споживачів вздовж ЛЕП під час ви-значення раціональних місць встановлення секціонуючих КА в розподільних мережах напру-гою 10 кВ / Р.О. Буйний // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – №1. – С.82–87.

УДК 621.311

**ВПЛИВ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ****Добровольська Л.Н.***Луцький Національний технічний університет, Україна, м. Луцьк*

Впливовим фактором на втрати електроенергії у електричних мережах (ЕМ) є розосереджені джерела енергії (РДЕ). Очевидно, що на значення втрат в ЕМ впливають як параметри РДЕ, так і схеми їх приєднання, а також обсяг та графік споживання суміжних навантажень. На разі приєднання РДЕ до шин підстанції трансформатор розвантажується на потужність, яка виробляється РДЕ, і в результаті зменшуються навантажувальні втрати в трансформаторі. В лініях електропередачі втрати не змінюються. Оскільки зменшується потік потужності, то зменшуються також втрати напруги, що сприяє покращенню рівнів напруги на шинах підстанцій 10/0,4 кВ [1].

Збільшення втрат в ЕМ за рахунок роботи РДЕ буде мати місце у випадку коли середня потужність генерації станції буде перевищувати аналогічний показник суміжного навантаження удвічі. Оцінити вплив джерел енергії на втрати потужності у гілках ЕМ можливо за результатами розрахунків усталених режимів [2]. Проте виділити в цих втратах складову від РДЕ є проблематично. Складність задачі оцінювання впливу режимів роботи РДЕ на втрати в ЕМ полягає в тому, що втрати потужності залежать від перетоків у гілках схеми мережі нелінійно і скористатися методом накладання неможливо. В інженерній практиці використовується ряд методів, що дозволяють виконувати розрахунок зазначеної складової втрат як з однозначно заданою інформацією, так і з імовірнісно-статистичним оцінюванням втрат [1]. Використання даних методів в розімкнених ЕМ, як правило, призводить до виникнення похибки, допустимої на етапі планування режимів ЕМ. Однак, у замкнених ЕМ збільшується вплив нелінійності функції втрат, що може викликати суттєві помилки обчислення додаткових технічних втрат електроенергії у випадку відхилення режиму ЕМ від планового.

Виходячи з вище наведеного слідує, що для оцінювання впливу РДЕ на втрати електроенергії в ЕМ необхідно застосовувати різні методи розрахунків усталених режимів в залежності від конфігурації ЕМ.

**Список використаних джерел:**

1. Лежнюк П.Д., Добровольська Л.Н., Кулик В.В. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем: навч. посіб. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
2. Добровольська Л.Н. Собчук Д.С. Черкашина В.В. Енергозберігаючі технології в енергетиці: міжвузівський навчальний посібник рекомендований Вченою радою ЛНТУ–Луцьк: Вежа-Друк, 2021. – 192 с.

УДК 621.316.925

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ  
СИСТЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ****Довгалоук О.М., Омеляненко Г.В., Мірошник К.А., Яковенко І.С.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Сучасний стан розвитку електроенергетики в багатьох країнах світу характеризується значними змінами, що відбуваються на всіх ланках генерації, передачі та споживання електричної енергії, які призводять до зміни системних і режимних параметрів та суттєво впливають на роботу систем релейного захисту (РЗ). Так, в енергосистемах значно зросла частка відновлювальних джерел енергії, які характеризуються стохастичним характером видачі потужності через значну залежність їх генерації від погодних умов. Це призводить до зміни поточкорозподілу в електричних мережах, причому для окремих ліній електропередачі (ЛЕП) змінюються напрямки протікання потужності. Поява таких ділянок електричної мережі з двонаправленими потоками енергії призводить до необхідності зміни налаштувань систем РЗ.

В системі передачі електричної енергії відбувається активне впровадження інтелектуального обладнання, створеного з використанням силової електроніки і працюючого в інших режимах, ніж звичайне силове обладнання. Таке обладнання спричиняє зміну параметрів режиму електричних мереж та викликає необхідність розробки і застосування адаптивних алгоритмів функціонування пристроїв РЗ.

Ланка споживання електричної енергії характеризується значним збільшенням кількості, потужності та характеристик споживачів, серед яких велика частка має сезонний графік споживання, а інша частка відноситься до активних споживачів-регуляторів, які здатні генерувати електричну енергію для себе, а надлишки поставляти до енергосистеми. Як наслідок, виникає необхідність адаптації систем РЗ до нових умов роботи, в яких струмові захисти підстанцій, диференційні струмові захисти ЛЕП будуть функціонувати в інших умовах.

В таких умовах системи РЗ стають ключовими для енергосистем щодо забезпечення режимів і ефективності роботи, в зв'язку з цим питання надійного функціонування систем РЗ стає особливо актуальним для енергетики в цілому.

Відповідно до [1] станом на 01.01.2020 р. 64,5 % від загальної кількості пристроїв РЗ та протиаварійної автоматики, що експлуатуються в енергосистемах системи передачі об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України, відпрацювали нормативний строк служби (рис. 1). Аналіз технічного стану систем РЗ для ОЕС України показав, що дуже великою є частка пристроїв РЗ, які експлуатуються понад 30 років, а також мікроелектронних пристроїв зі строком експлуатації понад 12 років, що є неприпустимим за сучасними вимогами до їх харак-

теристик та інформативності [2]. Виникла гостра необхідність реконструкції та модернізації захистів повітряних ЛЕП та автотрансформаторів, введених в експлуатацію понад 50 років назад, а також заміни напівпровідникових захистів, які експлуатуються понад 40 років і не можуть бути використані для створення автоматизованих систем оперативного та протиаварійного керування.

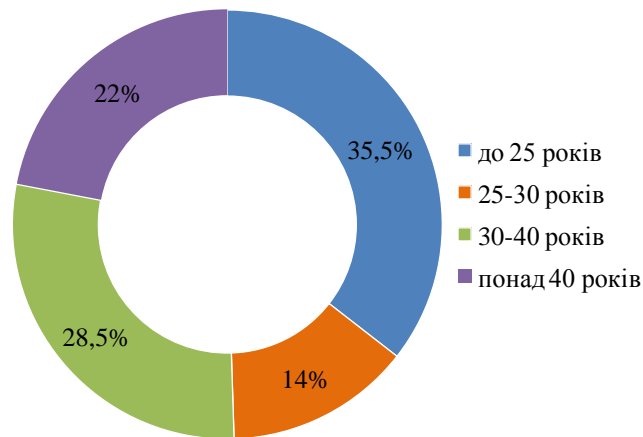


Рисунок 1 – Термін експлуатації систем РЗ в ОЕС України станом на 2020 р.

З метою підвищення надійності функціонування систем РЗ доцільно запроваджувати заходи, що враховують поточний стан розвитку енергетики, наявні технології та досвід їх впровадження в енергосистемах інших країн [3, 4]. На сьогоднішній день до таких заходів відносяться наступні: зміна апаратної бази захистів від електромеханічних реле до цифрових пристроїв; проведення планових перевірок стану систем РЗ для своєчасного виявлення дефектів та усунення несправностей; постійне підвищення рівня кваліфікації персоналу, що обслуговує системи РЗ; застосування принципів ближнього та далекого резервування; удосконалення алгоритмів роботи систем РЗ тощо. Зазначені заходи потребують детального аналізу та кількісного обґрунтування для впровадження в енергосистему.

Слід зазначити, що застосування розроблених заходів щодо підвищення надійності функціонування систем РЗ мають гарні перспективи стосовно розвитку інтелектуальних систем управління в ОЕС України.

#### Список використаних джерел:

1. План розвитку системи передачі на 2021-2030 роки. Національна енергетична компанія "Укренерго". [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/plan-rozvytku-oes-ukrayiny/>.
2. Організація експлуатації релейного захисту та автоматики в енергокомпаніях і їх структурних одиницях: СОУ-Н-ЕЕ 04.404:2006. – Київ: ОЕП «ГРІФРЕ», 2007. – 196 с.
3. Bo Z. Q. et al. Developments of power system protection and control / Protection and Control of Modern Power Systems. – 2016. – P. 1-8. DOI 10.1186/s41601-016-0012-2.
4. Бунько В. Я. Аналіз методів та засобів підвищення надійності елементів релейного захисту / Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2015. – № 3/1(23). – С. 26-30.

УДК 621.311.24

## ВПЛИВ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Довгалиук О.М., Стріляний І.Ю., Зіньков О.В.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Вітроенергетика на сьогоднішній день стрімко розвивається у світі та стає швидкозростаючою галуззю серед відновлювальних джерел енергії. Згідно з даними IRENA [1] глобальна встановлена потужність вітроенергетичних установок (ВЕУ) у світі постійно збільшується протягом останніх 10 років (рис. 1, а). Для України умови для розвитку вітроенергетики є дуже сприятливими через наявність значних територій з високим вітровим потенціалом, завдяки чому вже сьогодні встановлена потужність вітрових електростанцій (ВЕС) в енергосистемі України становить 1529 МВт, що дорівнює 2,73% у загальній структурі генерації (рис. 1, б) [2].

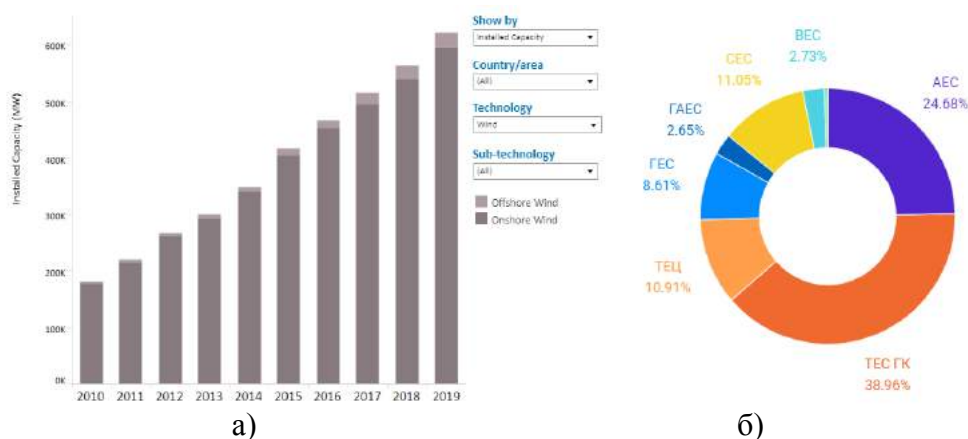


Рисунок 1 – Характеристика розвитку вітроенергетики:

- а) динаміка зміни встановленої потужності установок вітрової енергетики у світі [1];  
б) встановлена потужність ВЕС в енергосистемі України [2]

Аналіз стану розвитку вітрової енергетики у світі й в Україні показує, що ВЕУ широко поширені як у вигляді індивідуальних установок, що підключаються в розподільчих електричних мереж та покривають навантаження локальних побутових споживачів, так і у вигляді ВЕС, що підключені до живильних електричних мереж і видають значну потужність в енергосистему. Специфічною особливістю ВЕС є мінливість генерованої потужності в часі, оскільки вона суттєво залежить від погодних умов. При цьому слід враховувати, що ВЕС багатofакторно впливають на роботу електричних мереж, що залежить від топології електричної мережі, потужності, типу, місця підключення ВЕС, кліма-

тичних умов, поточної ситуації на енергоринку та ін. У свою чергу робота ВЕС істотно впливає на пропускну здатність ліній електропередачі, на надійність електропостачання, на якість електричної енергії в електричних мережах, на стійкість режимів роботи енергетичної системи загалом та її окремих частин [3]. Все це робить завдання дослідження режимів роботи електричних мереж із ВЕС особливо актуальним і важливим для енергетики.

Слід зазначити, що в Україні з впровадженням нового ринку електричної енергії ВЕС отримують гарні перспективи для участі в роботі балансуючого сегменту ринку. Завдяки цьому буде збільшуватись як їх кількість і встановлена потужність, так і їх вплив на режими роботи електричних мереж різних рівнів напруги.

Виконаний аналіз режимів роботи розподільних та живильних електричних мереж після підключення до них ВЕС будь-якої потужності показав, що відбувається суттєва зміна рівнів напруги у вузлах та потоків потужності в лініях електропередачі досліджуваної мережі. Це робить необхідними і вкрай важливими заходами перевірку забезпечення вимог щодо регулювання напруги, а також контролю пропускну спроможності лінії електропередачі в мережі.

Важливим фактором також є те, що підключення ВЕС до електричної мережі призводить до появи вищих гармонійних складових напруги, що потребує застосування заходів щодо забезпечення необхідного рівня якості електричної енергії в такій електричній мережі.

Аналіз статичної стійкості досліджуваних електричних мереж показав, що після підключення ВЕС запас статичної стійкості збільшується, що стабілізує роботу енергосистеми. В той же час вкрай необхідним і важливим стає контроль динаміки видачі генерованої потужності ВЕС в енергосистему та постійне його погодження із системним оператором для забезпечення стійкої роботи об'єднаної енергосистеми України в цілому.

Таким чином, виконаний аналіз показав, що підключення ВЕС до енергосистеми вносить суттєві зміни до параметрів режимів роботи електричних мереж, показників якості електроенергії та впливає на статичну стійкість енергосистеми в цілому. У зв'язку з цим підключення ВЕС будь-якої потужності обов'язково має бути обґрунтовано детальним аналізом їхнього впливу на режими роботи електричних мереж.

#### Список використаних джерел:

1. IRENA. Global renewable energy investment trends [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.irena.org/wind>.
2. Національна енергетична компанія "Укренерго". [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny>.
3. Dovgalyuk O., Bondarenko R., Miroshnyk K., Yakovenko I., Dyakov E., Syromyatnikova T. Features Analysis of Composite Supports Application for Electric Power Networks in Ukraine / 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2020, pp. 103-108, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250150.

УДК 621.311

## ОСНОВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІТЧИЗНЯНИХ НАУКОВЦІВ, ПРИСВЯЧЕНІ ПРОБЛЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЮ СТІЙКОЇ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

Дяговченко І.М.<sup>1</sup>, Василюк С.В.<sup>2</sup>, Лебедка С.М.<sup>1</sup>, Петровський М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сумський державний університет, Україна, м. Суми

<sup>2</sup>Національний університет водного господарства  
та природокористування, Україна, м. Рівне

Концепція енергетичної стійкості сьогодні стає пріоритетом для передових держав та міждержавних об'єднань. Так, нова Глобальна стратегія Європейського Союзу із зовнішньої політики та політики безпеки приділяє окрему увагу забезпеченню енергостійкості. Крім того, на Варшавському саміті НАТО у 2016 р. стійкість енергозабезпечення було визначено одним із критеріїв національної стійкості для країн-членів НАТО.

Серед вітчизняних вчених вагомий внесок у дослідження стійкості електротехнічних систем і мереж внесли Ю. І. Тугай, С. П. Денисюк, В. В. Козирський, В. М. Авраменко, О. М. Суходоля. В роботі [1] запропоновані шляхи аналізу статичної стійкості локальних сегментів електричної системи при наявності на нижньому рівні ієрархії джерел розосередженої генерації. В [2] розглянуто можливості застосування тензорного аналізу при розв'язанні задач оцінювання запасу статичної стійкості електричних систем. В роботі [3] запропоновано методику визначення запасу статичної стійкості в перетині Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України, яка дозволяє досягати граничного режиму без додаткових ітерацій. В статті [4] визначається предмет діяльності операторів критичної енергетичної інфраструктури в частині забезпечення стійкості енергосистеми.

Після аналізу наявних публікацій за тематикою, можна підсумувати, що українські науковці та галузеві фахівці переважно розглядають питання операційної безпеки функціонування ОЕС України [1-4].

### Список використаних джерел:

1. Тугай Ю. І. та ін. Дослідження впливу розосередженої генерації в розподільчих мережах на стійкість режимів локальних сегментів електричних систем / Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2017. – № 187. – С. 3–5.
2. Козирський В. В., Тугай І. Ю., Тютюнник Ф. О. Про використання тензорного аналізу в задачах визначення запасу статичної стійкості електричних систем за наявності джерел розподіленої генерації / Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2018. – № 50. – С. 23–27.
3. Авраменко В. М., Юнеєва Н. Т., Кришталь А. О. Автоматизований розрахунок запасу статичної стійкості у перетині електроенергетичної системи / Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2019. – № 1. – С. 18–23.
4. Суходоля О. М. Стійкість енергетичної системи чи стійкість енергозабезпечення споживачів: постановка проблеми / Стратегічні пріоритети. – 2018. – № 2. – С. 101–117.

УДК 621.315.626

## МОДЕЛЬ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВВОДА ДЛЯ АНАЛІЗА ЧУТЛИВОСТІ ПРИБОРУ ДО ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ВНУТРІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

Загайнова О.О., Сердюкова Г.М.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Запропоновано модель високовольтного вводу для аналізу чутливості пристрою до зміни параметрів внутрішньої ізоляції.

Оскільки достовірність контролю під робочою напругою багато в чому визначається чутливістю розробленого пристрою до змін стану внутрішньої ізоляції вводу, то важлива оцінка чутливості пристрою до зміни параметрів внутрішньої ізоляції високовольтних вводів. Для моделювання параметрів внутрішньої ізоляції високовольтного вводу були використані дані реально встановленого вводу напругою 330 кВ на ПС «Артема» Харківобленерго. Для оцінки зв'язку діелектричних втрат ізоляції конденсаторного типу вводу з його станом, використовуємо схему заміщення рис. 1. Ця схема повинна бути обрана з таким розрахунком, щоб активна потужність, що виділяється в даній схемі, дорівнювала потужності, що розсіюється в ізоляції вводу, а струм був би зрушений щодо напруги на той же кут, що і в даному вводу [1].

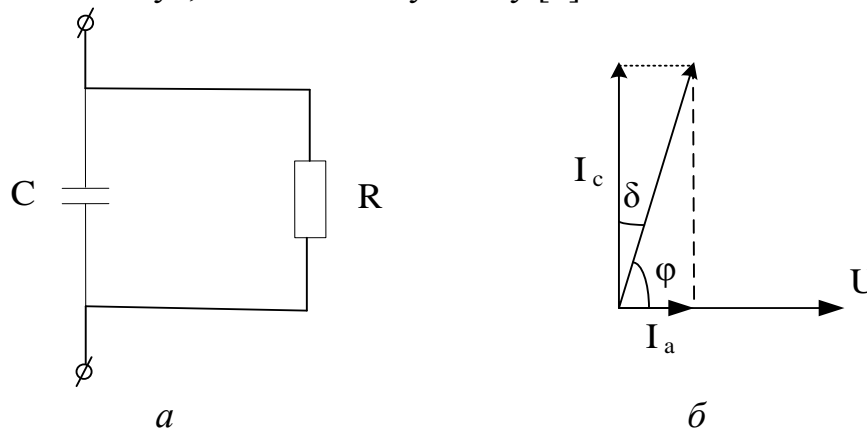


Рисунок 1 – Спрощена схема заміщення вводу (а)  
і векторна діаграма струмів через діелектрик з втратами (б)

Моделюваними параметрами є ємність внутрішньої ізоляції вводу, активний опір вводу і опір, який моделює зміну параметрів внутрішньої ізоляції. Із векторної діаграми маємо [2]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R}, \quad (1)$$

де  $I_a$ ,  $I_C$  – активний і ємнісний струми через діелектрик;  $C$  – ємність;  $R$  – опір;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс кута діелектричних втрат.

Були визначені чисельне значення модельованих параметрів схеми, представленої на рис.1.

Чисельне значення ємнісного струму – 38,55 мА, активного струму – 0,2197 мА, чисельне значення опору – 891,4 мОм.

Потужність втрат через ізоляцію високовольтного вводу:

$$P = U_{\phi} \cdot I_a, \quad (2)$$

де  $U_{\phi}$  – фазна напруга,  $I_a$  – активний струм.

Чисельне значення потужності втрат для даного вводу – 43,0259 Вт.

Визначено зміна потужності втрат при зміні тангенса кута діелектричних втрат на 0,2%. При зміні значення тангенса кута діелектричних втрат ( $\operatorname{tg} \delta$ ), рівного 0,0057, на 0,2%, отримуємо нове значення тангенса кута діелектричних втрат – 0,005814.

Потужність втрат складе: 43,88646 Вт, а зміна потужності втрат – 0,86 Вт. Це значення потужності втрат необхідно змоделювати для визначення можливості приладу реєструвати зміни параметрів ізоляції вводу.

Як схема, що моделює параметри, була обрана схема, як забезпечує достатню точність, стабільність і потужність.

Щоб отримати значення активної складової струму, відповідне зміни тангенса кута діелектричних втрат на 2%, необхідно підключити опір рівній 2 кОм.

Експеримент проходив у два етапи. На першому етапі експеримент проходив без підключення додаткового опору. Пристроєм контролю ізоляції ввводів реєструвалися значення параметрів струму, напруги, активної потужності і реактивної потужності. Ці значення, в відносних одиницях, передавалися на ПК і зберігалися в файл. На другому етапі знімалися значення параметрів струму, напруги, активної потужності і реактивної потужності з урахуванням підключення опору, що моделює зміна параметрів ізоляції.

У ході експерименту при незмінних значеннях параметрів ізоляції, значення активної потужності за час вимірювання не змінюється, а при зміні опору моделі на 2 кОм, що для реального вводу відповідає зміні активної потужності на 0,86 Вт, значення активної потужності змінюється на 0,192%.

### Список використаних джерел:

1. Загайнова А. А. Усовершенствованный метод и устройство контроля изоляции конденсаторного типа высоковольтного оборудования под рабочим напряжением / А. А. Загайнова // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. – 2013. – №30. – С. 102–107.
2. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. / П. М. Сви. – Энергоатомиздат. – 1992. – 240 с.

УДК 536.242

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІННОГО БЛОКУ ДЛЯ PV/T СИСТЕМИ****Зайцев Р.В., Войтович Ю.С., Мінакова К.О., Кіріченко М.В., Стисло Б.О.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Найбільш розповсюдженим типом сонячних елементів є приладові структури на основі моно- та полікристалічного кремнію товщиною до 200 мкм. Основною проблемою їх широкомасштабного використання є висока ціна електричної енергії яку вони виробляють, що обумовлено високою матеріало- та енергоемністю технологічного процесу виготовлення. Для зниження ціни сонячних елементів перспективним є використання систем, які працюють в умовах концентрованого сонячного випромінювання. Використання дзеркал дозволяє в сотні разів знизити витрати сонячних елементів (СЕ).

Розроблена раніше [1] фотоенергетична установка на основі багатоперехідних кремнієвих СЕ з вертикальними діодними комірками або з СЕ на основі арсеніду галія, яка має систему позиціонування та управління, що дозволяє збільшити кількість світлової енергії, що надходить на поверхню енергетичної установки, має багато переваг. Така фотоенергетична установка буде виробляти не тільки електричну енергію, а й теплу воду. Але поряд із цим, виявилися суттєві недоліки щодо рівномірного охолодження встановлених ФЕП, котрі потребували окремого вирішення [2]. Більш придатними до використання у сегменті комбінованої генерації є PV/T системи с тонкими гнучкими сонячними елементами, наприклад, СЕ на основі аморфного кремнію.

Метою цієї роботи було проведення математичного моделювання основних параметрів теплообмінного блоку для PV/T системи на основі загальних моделей теплообміну при примусовій циркуляції рідини.

Для визначення коефіцієнту теплопередачі при заданій температурі теплоносія і температурі поверхні, що обтікається, необхідно визначити градієнт температури на стінці теплообмінника. Градієнт температури можна визначити з рішення рівняння енергії, котре в свою чергу залежить від розподілу швидкості потоку в області протікання, що розглядається. В загальному вигляді вирішення задачі конвективного теплообміну для протікання рідини вздовж площини зводиться до вирішення наступної системи диференціальних рівнянь (1). Така система рівнянь в загальному вигляді не піддається аналітичному вирішенню, тому розглядаються окремі випадки.

На підставі запропонованої математичної моделі було проведено ряд модельних експериментів із різними параметрами, а саме товщиною пластини (від 0,5мм до 3мм) та швидкістю потоку теплоносія (від 0,1 м/с до 1,0 м/с) у системі. Ключовою задачею було знайти оптимальний баланс між цими параметрами, рівномірністю теплообміну і собівартістю системи. Опорним експериментом було дослідження процесів теплообміну у пластині класичного плоского однотрубного

теплового колектору для її використання у складі гібридної фотоенергетичної установки. Характерні результати дослідження наведено на рис. 1.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + g_x \\ \frac{\partial w_y}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + g_y \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \\ p = \rho RT \end{array} \right. \quad (1)$$

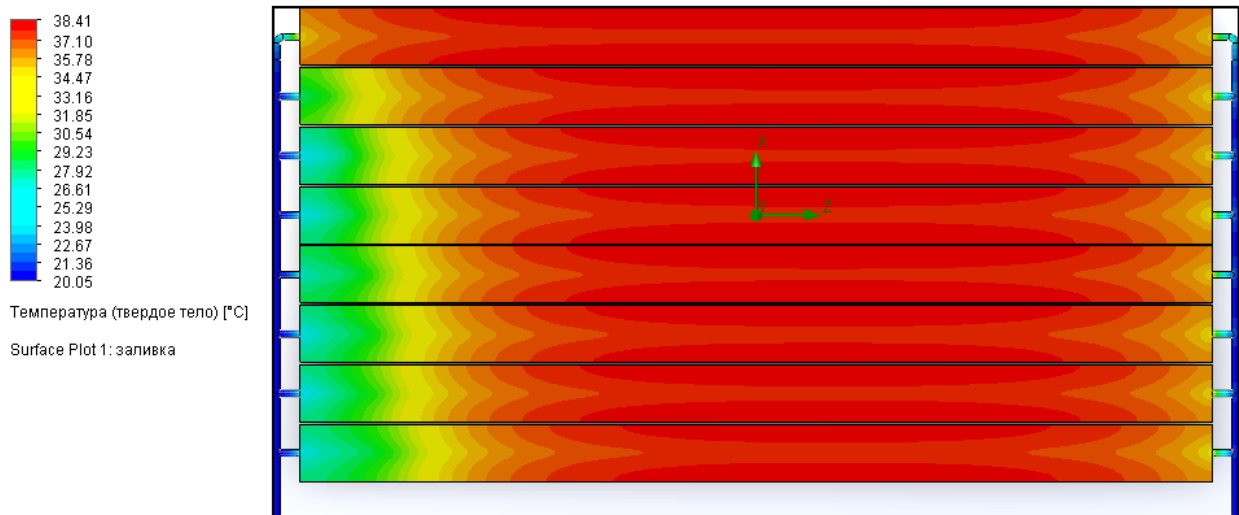


Рисунок 1 – Моделювання теплообмінного блоку PV/T системи

За отриманими результатами спостерігається залежність, що зі збільшенням товщини пластини та збільшенням швидкості потоку розподіл температур на поверхні стає більш рівномірним (різниця температур по поверхні пластини не перевищує 4-5 °C). Однак основний недолік полягає у тому, що для досягнення швидкості потоку теплоносія більше за 0,6 м/с необхідні суттєві витрати потужності на циркуляційний насос, а при збільшенні товщини пластини теплообмінника більше ніж 2 мм її використання буде недоцільним за масою та собівартістю.

### Список використаних джерел:

1. Zaitsev R.V. Increasing of the effectiveness of the industrial silicon photo-electric transformers for the hybrid photo-power module / R.V. Zaitsev, M.V. Kirichenko, L.V. Zaitseva, N.V. Veselova // Наукові нотатки. – 2017. – № 59. – С. 119-125.
2. Zaitsev R.V. Modeling of an advanced heat exchange unit with microchannels for a combined photoenergy system / R.V. Zaitsev // Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – No 3. – P. 57-62.

УДК 621.311

## ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАРІАНТІВ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ

Зозуля Є.Р., Федосєєнко О.М.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Запропоновано варіант розвитку електричної мережі на основі аналізу надійності електропостачання споживачів.

В роботі було здійснено аналіз надійності двох варіантів електропостачання, які наведені на рис. 1. У першому варіанті передбачається спорудження від джерела живлення, а саме підстанції 330/110 кВ, до підстанцій споживачів 1 і 2 двох двоколових ліній Л1 і Л2; пропускна здатність кожного кола - 100% переданої потужності. В процесі розрахунку було враховано факт, що події пошкодження кіл лінії залежні одне від одного, тобто, якщо пошкодження одного кола двоколової лінії відбулося, то ймовірність пошкодження іншого кола дорівнює 0,5. У другому варіанті передбачається спорудження трьох ліній Л1, Л2, Л3, пропускна здатність кожного кола, так само як і в першому варіанті, 100% переданої потужності. Події пошкодження ліній в другому варіанті незалежні, так як лінії прокладаються по різних трасах.

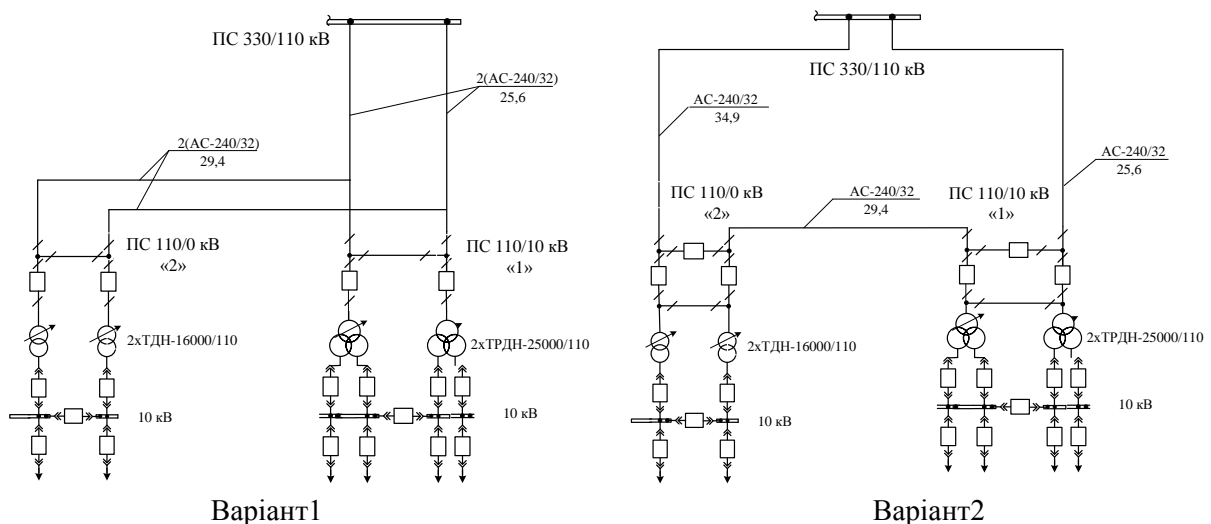


Рисунок 1 – Схеми електричної мережі

Отримано ймовірність передачі 100% потужності споживачам підстанції 1 і 2 при електропостачанні їх за варіантом 1. Так як пропускна здатність кожного кола складає 100% потужності, то споживачі підстанції 1 і 2 втрачають живлення при пошкодженні двох кіл лінії Л1. В розрахунках було враховано, що ймовірність ушкодження другого кола лінії залежить від ймовірності пошко-

дження першої кола. Шляхом застосування теореми множення для залежних подій отримано ймовірність пошкодження двох кіл лінії Л1 за формулою [1]

$$Q_l(t) = q_{l1}(t) \left( \frac{q(t)}{q_{l1}(t)} \right), \quad (1)$$

де  $q_{l1}$  – ймовірність пошкодження першого кола лінії Л1;  $\frac{q(t)}{q_{l1}(t)}$  – умовна ймовірність пошкодження другого кола лінії Л1 при пошкодженні першого кола.

Ймовірність надійного електропостачання споживачів підстанції 1 для першого варіанту визначається як [1]

$$P_1(t) = 1 - Q_l(t). \quad (2)$$

Відповідно для споживачів підстанції 2 ймовірність надійного електропостачання визначається за формулою

$$P_2(t) = P_1(t) \left\{ 1 - q_{l2}(t) \left( \frac{q(t)}{q_{l2}(t)} \right) \right\}, \quad (3)$$

де  $q_{l2}$  – ймовірність пошкодження першого кола лінії Л2;  $\frac{q(t)}{q_{l2}(t)}$  – умовна ймовірність пошкодження другого кола лінії Л2 при пошкодженні першого кола.

Визначено ймовірність передачі 100% потужності споживачам підстанції 1 і 2 при електропостачанні їх за варіантом 2 (рис. 1, варіант2). Ймовірність надійного електропостачання споживачів підстанції 1 отримано як для системи, яка складається з паралельних ліній. Ймовірність надійного електропостачання споживачів підстанції 2 також визначено як для системи, що складається з паралельних ліній.

Відповідно до результатів розрахунку ймовірність втрати електропостачання споживачами підстанції 1 у другому варіанті менше в 1,515 разів, а для споживачів підстанції 2 – в 2,778 разів.

Таким чином, можна зробити висновок, що надійність електропостачання при виконанні схеми мережі за другим варіантом набагато вище, ніж за першим варіантом. На основі проведеного аналізу для подальшого проектування було запропоновано другий варіант розвитку електричної мережі.

### Список використаних джерел:

1. Мінченко А.А., Богатирьов І.М., Лазуренко О.П. Теорія надійності в задачах електроенергетичних систем : навч. посіб. – Харків: НТУ «ХП», 2012 – 141 с.

УДК 621.316

## АНАЛІЗ ОЦІНКИ НОРМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ПІДКЛЮЧЕННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ДО СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Калюжний Д.М.

*Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова, Україна, м. Харків*

Сучасні споживачі електричної енергії в своїй переважній більшості характеризуються великою кількістю напівпровідникових перетворюючих пристроїв. З точки зору електромагнітної сумісності вони є джерелом емісії електромагнітних завад, які призводять до погіршення якості електричної енергії. Відповідно до [1-4] прийняття рішення про можливість підключення таких електроустановок до електричної мережі приймається на основі порівняння розрахункового та запланованого рівня електромагнітної завади. Ця процедура поділяється на три основні етапи. До першого етапу відноситься спрощена оцінка емісії завад. Вона полягає у тому, що усі споживачі, погоджена потужність яких значно менша потужності короткого замикання зі сторони джерела живлення, можуть бути підключені електричній мережі без спеціальної оцінки. Якщо потужність установки велика то, відповідно, до другого етапу визначається її припустимий вклад в сумарний рівень завад з урахування абсорбуючої спроможності системи, який в подальшому порівнюється з розрахунковим рівнем емісії цієї установки. Якщо розрахунковий рівень емісії перевищує припустимий для даної установки переходять до третього етапу, який передбачає прийняття більш високого рівня емісії при певних умовах, які погодженні з мережевою організацією.

Розглянутий підхід носить рекомендаційний характер. Визначення фактичного внеску споживача в погіршення якості електричної енергії можливо здійснити тільки за результатами вимірів параметрів режиму роботи після підключення електроустановки до мережі.

### Список використаних джерел:

1. Electromagnetic compatibility (EMC). Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems. Technical report IEC/TR 61000-3-13, Ed. 1, International Electrotechnical Commission, 2008.
2. Electromagnetic compatibility (EMC). Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems. Technical report IEC/TR 61000-3-6, Ed. 2, International Electrotechnical Commission, 2008.
3. Electromagnetic compatibility (EMC). Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems. Technical report IEC/TR 61000-3-14, Ed. 1, International Electrotechnical Commission, 2011.
4. ENA EREC G5/5. Harmonic voltage distortion and the connection of harmonic sources and/or resonant plant to transmission systems and distribution networks in the United Kingdom. 2020.

УДК 621.316.925

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МІСТ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

**Коробка В.О., Сиромятнікова Т.В.**

*Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова, Україна, м. Харків*

Електричні мережі сучасних систем електропостачання міст являють собою складні комплекси електротехнічного обладнання, які постійно знаходяться під впливом різноманітних збурень. За певних умов дія збурень може привести до пошкодження окремих елементів або аварій, які впливають на значну частину системи електропостачання. Для виявлення пошкоджень та подальшого запобігання виникненню аварійних режимів в електричних системах застосовуються пристрої релейного захисту та мережева автоматика [1].

Останніми роками в енергосистемах України широко впроваджуються пристрої релейного захисту, виконані на цифрових принципах, вони поєднуються в спільну інформаційну мережу, для організації якої використовують комп'ютери з потужними процесорами. Це надає цифровим пристроям релейного захисту (ЦПРЗ) ряд суттєвих переваг у порівнянні із електромеханічними та напівпровідниковими пристроями [2]:

- вища точність відтворення заданих характеристик функціонування пристрою;
- отримання характеристик будь-якої складності, можливість зміни форми характеристик без додаткових технічних переробок (на алгоритмічному рівні);
- запам'ятовування координат режиму під час спрацювання, що дає змогу детального аналізу аварійних ситуацій, визначати причини аварії і на основі цього при необхідності уточнювати та змінювати характеристики захистів та автоматики;
- можливість змінювати конфігурацію пристрою на програмному рівні при розвитку електричної мережі;
- універсальність використаних в структурі ЦПРЗ процесорних модулів надає можливість створювати різні типи захистів та автоматики, відкоригувавши вхідні та вихідні кола та змінюючи алгоритм функціонування;
- менші габарити та затрати електротехнічних матеріалів на виготовлення пристроїв;
- можливість самодіагностики, закладену в алгоритми функціонування ЦПРЗ;
- менше навантаження на первинні вимірювальні трансформатори струму та напруги;

- менше споживання енергії для функціонування, що істотно зменшує потужність джерел енергії оперативного струму;
- простота експлуатації.

Серед основних недоліків, що стримують впровадження ЦПРЗ, слід відмітити їх відносно високу ціну, необхідність забезпечити на кожному енергетичному об'єкті наявність обслуговуючого персоналу, який має відповідні навички експлуатації цих пристроїв, відповідної комп'ютерної техніки, а також необхідності постійного підвищення рівня кваліфікації персоналу.

Аналіз особливостей експлуатації ЦПРЗ в багатьох країнах світу показав, що спостерігається зниження надійності функціонування таких пристроїв за рахунок зменшення часу напрацювання на відмову окремих модулів цифрових пристроїв та їх окремих складових, зокрема процесорів, аналогово-цифрових перетворювачів, пристроїв живлення тощо. В той же час застосування універсальних типових елементів у складі ЦПРЗ надає змогу швидкого відновлення їх роботи, хоча й призводить до додаткового здорожчання обслуговування цих пристроїв.

Сучасним системам електропостачання міст притаманний активний розвиток, введення нових генеруючих потужностей та підключення значної кількості нових споживачів, а також підвищення вимог з боку споживачів до надійності електропостачання. Такий стан призводить до появи нових викликів до систем релейного захисту [3], для вирішення яких необхідно корегування алгоритмів роботи релейних захистів та мережевої автоматики для адаптації до нових умов. Доцільним стає також широке впровадження ЦПРЗ, які дозволяють вирішувати ці задачі.

Враховуючи зазначене, можна стверджувати, що впровадженні ЦПРЗ сприятиме підвищенню ефективності та надійності роботи електричних мереж сучасних систем електропостачання міст.

#### **Список використаних джерел:**

1. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа. – 2007. – 639 с.
2. Кідиба В. П Релейний захист електроенергетичних систем. Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 504 с.
3. Ніценко В.В. Інновації в індустрії релейного захисту: сучасні виклики та перспективи розвитку / Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2018. – № 2 (110). – С. 12–18.

УДК 621.316.925

**РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ  
СХЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ****Крамський І.О., Петровський М.В., Лебедка С.М., Загородня Т.М.***Сумський державний університет, Україна, м. Суми*

У сучасному інформаційному світі стрімкий розвиток комп'ютерних технологій призвів до широкого використання дистанційних технологій навчання. Складність реалізації деяких схем релейного захисту в лабораторних умовах ускладнює дослідження роботи пристроїв та впливів різних схем з'єднання елементів захисту. Створення віртуальних схем релейного захисту дозволяє моделювати поведінку реле в віртуальному середовищі і допомагає в опануванні новими знаннями та вміннями. Використання моделей дає змогу не лише спостерігати за певним експериментом, а й безпосередньо брати в ньому участь, а це, в свою чергу, сприяє засвоєнню знань на більш свідомому та глибокому рівні.

В роботі запропоновано реалізацію чотирьох моделей схем релейного захисту в програмному комплексі MatLab.

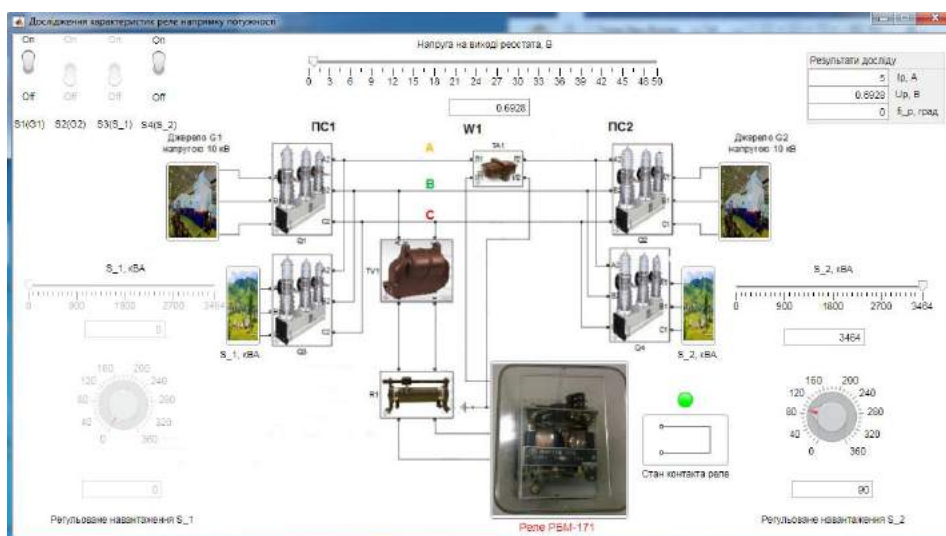
Перша модель демонструє роботу реле струму. Схема складається з джерела змінної напруги, до якого під'єднано вимикач, реостат, амперметр та реле РТ-40/2. Величину напруги, опору, уставки та способи з'єднання котушок реле можна змінювати. У моделі врахована реальна характеристика спрацювання реле РТ-40, що дозволяє знаходити коефіцієнт повернення. Також врахована залежність часу спрацювання реального реле, що дозволяє досліджувати характеристику часу спрацювання реле РТ-40/2 від кратності струму в області струмів близьких до струму спрацювання.

Друга модель дозволяє досліджувати характеристики реле напрямку потужності прямої послідовності РБМ-171 (рис. 1а) та нульової послідовності РБМ-178 (рис. 1б). Стенд складається з двох трифазних джерел живлення напругою 10 кВ, що під'єднані до лінії електропередавання вимикачами, що входять до складу підстанцій. Кожна із підстанцій має своїх споживачів, які підключаються ввімкненням тумблерів. На віртуальному стенді можливе регулювання повної потужності навантаження, фазовий зсув та зміни напрямку перетікання потужності. Модель самого реле побудована на його реальних технічних даних, що дозволяє експериментально отримати характеристики (чутливості, кутову) та кут максимальної чутливості.

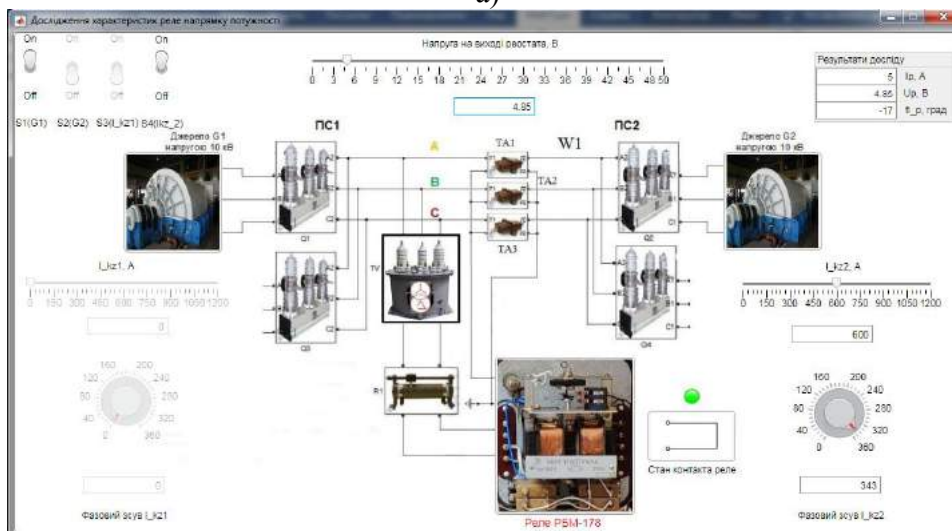
Третя модель демонструє роботу двофазного максимального струмового захисту (МСЗ) на постійному оперативному струмі. Даний стенд імітує роботу електричної мережі 10 кВ. Основними елементами моделі є трифазне джерело змінної напруги, високовольний вимикач, лінія електропередач (ЛЕП), навантаження та схема МСЗ. При запуску моделі автоматично з'являються вікна, в яких у вигляді анімації будуються графіки залежності струмів, що протікають у

кожній фазі та стан елементів від часу. Існує можливість збереження графіків залежностей.

Четверта модель розроблена для дослідження двофазного максимального струмового спрямованого захисту (МССЗ) ЛЕП. У віртуальному стенді розглядається мережа з двостороннім живленням, до якої входять: симетричні трифазні джерела змінної напруги, ЛЕП, високовольтні вимикачі, споживачі та МССЗ. Модель дозволяє налаштувати параметри елементів схеми шляхом їх введення через інтерфейс користувача. За допомогою групи вимикачів можна в схемі промоделювати трифазне та двофазне КЗ. При запуску моделі розраховуються струми, які протікають в лінії у нормальному, аварійному та післяаварійному режимах. Після закінчення моделювання, з'являються графіки залежності струмів, що протікають у кожній фазі та стан елементів від часу.



а)



б)

Рисунок 1 – Віртуальний стенд з дослідження реле напрямку потужності:  
а) – РБМ-171; б) – РБМ-178

УДК 621.316.9

**ОЦІНЮВАННЯ МАКСИМАЛЬНИХ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ  
В ГРОЗОЗАХИСНІЙ СИСТЕМІ ПЛ НАПРУГОЮ 750 кВ****Красножон А.В.<sup>1</sup>, Квицинський А.О.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна, м. Чернігів<sup>2</sup> НЕК «Укренерго», Україна, м. Київ

В світі все більшого поширення набуває концепція Smart Grid, яка передбачає збір інформації про стан та режим роботи електричних мереж. В якості каналів для передачі такої інформації часто використовують самі повітряні лінії електропередачі (ПЛ) шляхом оснащення їх волоконно-оптичними лініями зв'язку. Часто такі лінії вбудовують у сучасні грозозахисні троси (ГЗТ), або ж троси типу ОКГТ. В даний час в Україні триває процес поступової заміни існуючих ГЗТ на троси типу ОКГТ для магістральних ПЛ напругою 750 кВ та 330 кВ. Згідно з діючими нормами [1], при використанні на ПЛ ГЗТ типу ОКГТ ці троси мають бути з'єднані з кожною опорою ПЛ. Очевидно, що такі заходи покращують грозозахист, однак, в результаті в грозозахисній системі ПЛ утворюються короткозамкнені контури, крізь які проходить змінний магнітний потік від струмів у фазних провідниках ПЛ, який призводить до появи у ГЗТ наведеного струму і додаткових втрат активної потужності. Питання оцінювання величини цих втрат для магістральних ПЛ є актуальним і потребує висвітлення.

Очевидно, що найбільших втрат слід очікувати в грозозахисній системі ПЛ напругою 750 кВ, тому що грозозахисна система таких ПЛ має найбільші розміри та складається з двох ГЗТ, які фактично утворюють замкнений контур. Також слід зазначити, що дані ПЛ часто транспортують електроенергію від енергоблоків АЕС, отже працюють цілодобово зі значним завантаженням.

Найчастіше ПЛ 750 кВ виконані на опорах типу ПП-750, зовнішній вигляд таких опор з усіма розмірами наведено в [2]. Відстань між фазами по горизонталі становить  $x_f = 18$  м, відстань між ГЗТ та віссю симетрії опори  $x_t = 16,75$  м. Висоту розташування фазних провідників приймаємо рівною  $y_f = 15,9$  м, висота розташування ГЗТ  $y_t = 27,75$  м. За умови, якщо ПЛ 750 кВ передає 1 ГВт потужності, маємо діюче значення струму у кожній фазі приблизно 810 А.

За цими даними можна розрахувати магнітний потік, зчеплений з грозозахисною системою ПЛ, при цьому слід застосувати символічний метод та врахувати, що потік створюють лише крайні фази ПЛ, тому що середня фаза розташована симетрично відносно грозозахисної системи та не створює в ній магнітного потоку.

Активний опір грозозахисної системи ПЛ 750 кВ легко визначити, знаючи погонний активний опір  $R_0$  ГЗТ типу ОКГТ та довжину  $l$  заданої ПЛ. Реактивний опір можна визначити, знаючи діаметр  $d$  ГЗТ, через індуктивність кон-

туру, утвореного двома ГЗТ. Цю індуктивність можна визначити як індуктивність безмежно довгої двопровідної лінії за формулою [3]:

$$L_{\text{ГЗТ}} = \frac{l \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{4 \cdot x_t}{d} \right) + \frac{1}{4} \right). \quad (1)$$

Відомо, що в контурі, утвореному двома ГЗТ, будуть спостерігатись максимальні втрати, якщо виконується умова рівності активного та реактивного опорів цього контуру:

$$R_{\text{ГЗТ}} = X_{\text{ГЗТ}}. \quad (2)$$

Приймемо, що грозозахисна система ПЛ 750 кВ виконана двома ГЗТ типу OPGW-52-AL3/29-A20SA, зовнішній діаметр такого тросу  $d = 12$  мм, а погонний активний опір  $R_0 = 0,519$  Ом/км. Довжину ПЛ приймаємо рівною 500 км. В такому випадку активний опір контуру, утвореного двома ГЗТ, становить  $R_{\text{ГЗТ}} = 519$  Ом, а реактивний опір  $X_{\text{ГЗТ}} = 557,8$  Ом, тобто маємо значення, близькі до умови забезпечення максимальних втрат.

При струмі фази у 810 А розрахована величина струму в ГЗТ становить 65 А, а втрати потужності в грозозахисній системі ПЛ становлять 2,2 МВт (на 500 км довжини ПЛ). Протягом року будемо мати втрати електроенергії величиною 19272 МВт·год. Враховуючи існуючий тариф на передачу електроенергії в магістральних ПЛ (293,93 грн. за МВт·год.), будемо мати вартість таких втрат 5,665 млн. грн. на рік. Якщо взяти до уваги кількість всіх ПЛ 750 кВ та їх загальну протяжність, то стає очевидним, що на етапі проектування нових ПЛ 750 кВ або ж на етапі модернізації існуючих слід оцінювати величину втрат і обґрунтовано підходити до вибору марки ГЗТ. Слід уникати ГЗТ, для яких виконується умова (2), бо саме в цьому випадку втрати і будуть максимальними.

### Список використаних джерел:

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Форт, 2017. – 760 с.
2. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ. В 4-х т. Т.2 / Под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. – М.: Папирус Про, 2003. – 640 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники В 2-х т. Т.2. – Л.: Энергия, 1967. – 407 с.

УДК 621.314.21

## АНАЛІЗ ВИНИКНЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ЄМНІСНИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРУГИ

Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю., Мельничук В.А.

*Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Україна, м. Київ*

Ферорезонанс – є складним, часто хаотичним явищем, що виникає в електричній мережі з ємністю та нелінійною індуктивністю, і може викликати високі напруги, струми, приводити до розвитку аварій в енергетичній системі.

В електричних мережах є багато передумов для виникнення ферорезонансу [1], оскільки існує значна кількість нелінійних індуктивностей та ємностей.

Ферорезонанс може розвиватися в електричній мережі не тільки при наявності індуктивних трансформаторів напруги [2], але і за участю ємнісних трансформаторів напруги.

Для того, щоб визначити умови виникнення та розвитку ферорезонансних процесів в електричній мережі з ємнісними трансформаторами напруги була розроблена модель мережі за допомогою пакета Simscape Electrical.

При моделюванні за допомогою перемикання вимикача, були отримані ферорезонансні коливання не тільки на основній частоті, але і на субгармонійній. З отриманих результатів можна зробити висновок, що виникнення ферорезонансу в мережах з ємнісними трансформаторами напруги може привести до неправильної роботи пристроїв релейного захисту.

На практиці для зниження небезпеки появи та розвитку ферорезонансних процесів в електричних мережах при підключенні ємнісних трансформаторів напруги необхідно проводити корекцію параметрів елементів ферорезонансного кола.

Для виявлення нетипових ферорезонансних явищ (наприклад, хаотичних [3]) в електричних мережах з ємнісними трансформаторами напруги необхідно проводити аналіз поведінки нелінійного резонансного кола, що є динамічною системою і відноситься до класу нелінійних дисипативних осциляторів.

### Список використаних джерел:

1. Ferracci P. Ferroresonance // Cahier technique. Schneider Electric. – Paris, 1998. – №. 190. – P. 1–28.
2. Tugai I. Investigation of ferroresonance in electrical networks at open-phase operating conditions // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 5, No. 1. – P. 61– 64.
3. Кузнецов В. Г., Тугай І. Ю., Мельничук В.А. Моделювання хаотичного резонансного процесу в електричних мережах з вітряними електростанціями // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2021): тези доповідей XXIX міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 18–20 травня 2021 р.). – Харків: НТУ «ХП». – 2021. – С. 81.

УДК 621.311

## ЦІЛЬОВА ФУНКЦІЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ УЧАСТІ ПРОСЬЮМЕРІВ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОПЕРАЦІЯХ

Кулапін О.В., Махотіло К.В.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Зараз у світовій та вітчизняній енергетиці відбувається зміна звичної парадигми, що передбачала жорсткий розподіл учасників ринку на генерацію та споживачів. Раніше пасивні в своїй більшості споживачі тепер стають активними учасниками, які можуть генерувати і зберігати енергію від власних ВДЕ, а також пропонувати енергосистемі нові форми гнучкості і так необхідний потенціал реагування на попит. При чому це стосується не лише достатньо потужних споживачів з промислового сектору та сектору послуг, а й швидко зростаючого числа побутових споживачів-просьюмерів, які зараз можуть мати власну фотоелектричну систему, акумулятор електроенергії і різні «розумні» пристрої для управління профілем свого електричного навантаження [1].

Об'єднані у спільноту просьюмери за допомогою керуючих компаній-агрегаторів можуть не лише здійснювати двонаправлені перетоки енергії між своїми домогосподарствами і енергосистемою, але й торгувати енергією з сусідніми домогосподарствами. Така торгівля між просьюмерами в межах певного географічного місцеположення може призвести до створення локальних енергетичних ринків, які включатимуть місцеву генерацію, зберігання енергії і діяльність з регулювання потужності за рахунок управління попитом (*demand response*) на додаток до взаємодії з об'єднаною енергосистемою [2]. Це відкриває новий напрям розвитку енергетики, який сприятиме подальшому збільшенню долі ВДЕ в загальному виробленні енергії, а також нову область наукових досліджень.

Автоматизоване управління роботою таких об'єднань просьюмерів і кожного окремого їх члена при участі в енергетичних операціях потребує вирішення задачі оптимізації. Зазвичай, її мета задається як мінімізація витрат просьюмера на електроенергію на деякому проміжку часу, тобто різниці між витратами на купівлю енергії з мережі та продаж до неї [2]. В цій роботі пропонується вдосконалена цільова функція, яка враховує різні підходи до тарифікації енергії в мережі та на ВДЕ, в енергосистемі та у сусідніх просьюмерів, а також плату за послуги з управління попитом:

$$F = \sum_w \sum_i [(\lambda_{pur,L}(t_i) \cdot P_{pur,L}(w, t_i) + \lambda_{pur,G}(t_i) \cdot P_{pur,G}(w, t_i)) \cdot \Delta T - (\lambda_{vend,L}(t_i) \cdot P_{vend,L}(w, t_i) + \lambda_{vend,G}(t_i) \cdot P_{vend,G}(w, t_i)) \cdot \Delta T + C_{rew,DR}(t_i) \cdot x_{rew,DR}(t_i) - C_{pen,DR}(t_i) \cdot x_{pen,DR}(t_i)],$$

де  $w = \overline{1, N}$  – номер просьюмера;  $t_i = i \cdot \Delta T$  – часовий період;  $\Delta T$  – тривалість часового періоду, год;  $\lambda_{pur,L}(t)$  – тариф купівлі енергії у сусіда-просьюмера в період  $t_i$ , гр.од./кВтгод;  $P_{pur,L}(w, t)$  – потужність, отримана від сусіда-просьюмера в період  $t_i$ , кВт;  $\lambda_{pur,G}(t)$  – тариф купівлі енергії з мережі в період  $t_i$ , гр.од./кВтгод;  $P_{pur,G}(w, t)$  – потужність, отримана з мережі в період  $t$ , кВт;  $\lambda_{vend,L}(t)$  – тариф продажу енергії сусіду-просьюмеру в період  $t$ , гр.од./кВтгод;  $P_{vend,L}(w, t)$  – потужність, продана сусіду-просьюмеру в період  $t$ , кВт;  $\lambda_{vend,G}(t)$  – тариф продажу енергії в мережу в період  $t$ , гр.од./кВтгод;  $P_{vend,G}(w, t)$  – потужність, продана в мережу в період  $t$ , кВт;  $C_{rew,DR}(t)$  – разова виплата просьюмеру за надання енергомережі послуг зі зменшення чи збільшення навантаження, гр.од.;  $x_{rew,DR}(t)$  – двійкова змінна, рівна 1, якщо просьюмер надав послуги з управління попитом в період  $t$ , в іншому випадку – 0;  $C_{pen,DR}(t)$  – штрафна виплата просьюмера за порушення при наданні енергомережі послуги з управління попитом в період  $t$ , гр.од.;  $x_{pen,DR}(t)$  – двійкова змінна, рівна 1, якщо просьюмер порушив правила надання послуги управління попитом в період  $t$ , в іншому випадку – 0. Тут гр.од. – грошова одиниця.

При вирішенні оптимізаційної задачі  $F \rightarrow \min$  також необхідно враховувати виконання різного роду технічних та економічних обмежень. До них відносяться: забезпечення енергопостачання самого просьюмера, підтримання балансу потужностей в межах об'єднання просьюмерів, обмеження на передавання потужностей в мережі, обмеження на стан та швидкість зміни заряду акумуляторів, виконання умов надання послуг з управління попитом.

Запропонована в роботі цільова функція і постановка задачі оптимізації участі просьюмерів в енергетичних операціях враховує три різні типи транзакцій: купівлю/продаж електроенергії в енергосистемі, купівлю/продаж електроенергії по сусідству і надання системних послуг енергосистемі. Це дозволяє більш детально описувати нові можливості і мету взаємодії просьюмерів в їх локальних об'єднаннях, в діючому та перспективних ринках енергії.

### Список використаних джерел:

1. Кулапін О. В., Махотіло К. В. Моделювання смарт-мережі споживачів-просьюмерів з фотоелектричними системами / Вісник НТУ "ХПІ" – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – № 14 (1339). – С. 61–66.
2. M Gough, S. Santos Optimisation of Prosumers' Participation in Energy Transactions / 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe).

УДК 536.242

## ОДНОВІСНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА

Мінакова К.О., Зайцев Р.В.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Фотоелектричні системи, які перетворюють сонячну енергію в електричну є перспективними системами серед відновлюваних джерел енергії. Електроенергія, що виробляється фотоелектричними панелями, має великий потенціал, але на цей час є технологічні недоліки, що заважають збільшити їх ефективність. Більше того усунення цих недоліків здатне збільшити термін служби фотоелектричних систем та загальну кількість виробленої електроенергії.

Ефективність сучасних фотоелектричних елементів наразі складає від 10% до 38% при стандартних умовах. Ефективність фотоелектричних панелей менша, ніж фотоелектричних елементів, що використовуються для їх створення. Таким чином, одним із способів підвищення ефективності є пошук нових придатних конструктивних рішень.

Зазвичай поглинач теплового колектора складається із труб круглого перерізу, з'єднаних з пласкою пластиною поглинача. Пластина поглинає тепло, що надходить до сонячного елемента при його опроміненні сонячним світлом, і передає його теплоносію, що циркулює у трубах. Абсорбер та труби виготовляють із матеріалів з високим значенням теплопровідності (мідь, алюміній) для оптимізації переносу тепла до рідини і зменшення втрат. На рис. 1 наведено поперечний переріз поглинача.

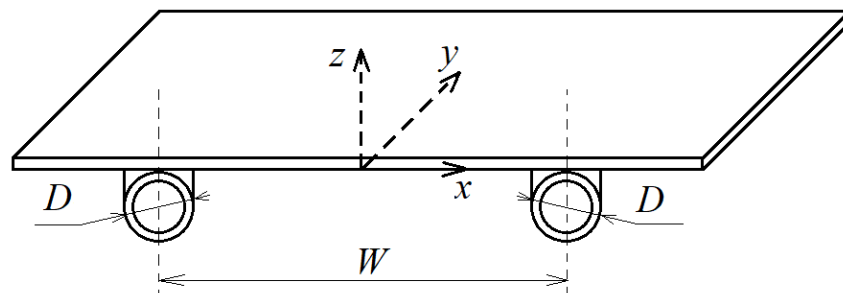


Рисунок 1 – Поглинач сонячного теплового колектора

Мінімальна температура ( $T_p$ ) у поглиначі спостерігається над трубою, що охолоджує. Максимальна температура спостерігається посередині між трубами ( $x = 0$ ), тобто на однаковому віддаленні від труб. Градієнт температури у цій точці дорівнює нулю, а температурний профіль є симетричним. Якщо градієнт дорівнює нулю, то за законом Фур'є, у цьому місці нема теплопередачі. Виходячи із цього, можна прийняти, що пластина абсорбера звичайне ребро радіатора при  $x = 0$  і довжиною  $(W-D)/2$ .

В цих умовах абсорбуючу секцію між серединою ( $x = 0$ ) та поверхнею над трубкою ( $x = (W-D)/2$ ) можна розглядати як класичну задачу (рис. 2).

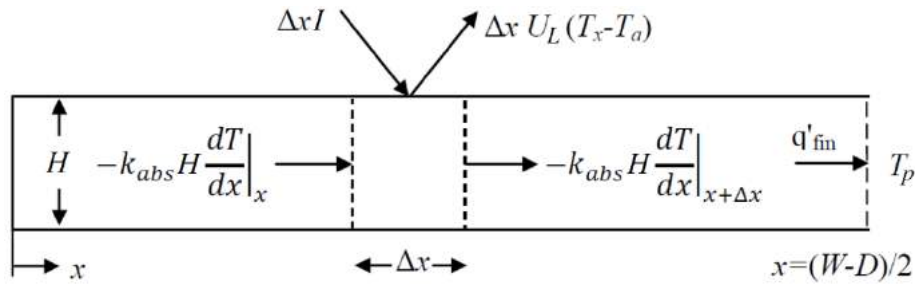


Рисунок 2 – Тепловий баланс на довільній ділянці поглинача

За результатами математичного аналізу у математичному пакеті РТС MathCAD було побудовано відповідну модель. З використанням зазначеної моделі були визначені максимально досяжні значення перепаду температур при використанні пласти класичного колектора (рис. 3, а). Для розрахунку використані наступні входні дані:  $T_a = 298 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $I = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ,  $T_f = 283 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 0,125 \text{ м}$ ,  $H = 0,0005 \text{ м}$ ,  $D = 0,12 \text{ м}$  та відповідні параметри теплопровідності міді. Використання розробленої моделі для вирішення оптимізаційних задач дозволить ще на етапі проектування сонячних колекторів та PVT систем обирати їх оптимальні параметри для досягнення максимальної ефективності та мінімальної собівартості. Наприклад, для підбору параметрів абсорбера для використання у PVT системах необхідно змінювати його геометричні параметри. На рис. 3, б наведено приклад моделювання зміни діаметру трубки з теплоносієм, з якого можна бачити суттєвий вплив діаметру трубки на різницю температур вздовж поверхні абсорбера.

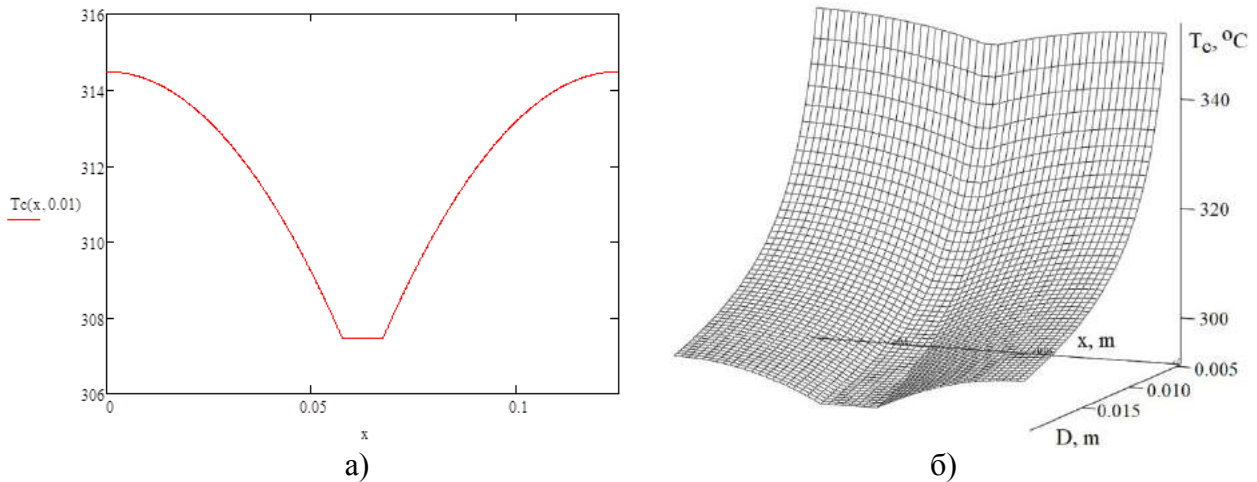


Рисунок 3 – Розподіл температури за пластиною абсорбера колектора (а) та результати моделювання впливу діаметру трубки з теплоносієм на розподіл температури по поверхні абсорбера (б)

### Список використаних джерел:

1. Minakova K.A. Advanced Heat Transfer Model of PV/T System / K.A. Minakova, R.V. Zaitsev // 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2021) 26-28 August 2021, Conference proceedings. – Lviv: IEEE, 2021. – P. 482-485.
2. Minakova K.A. Improving the Solar Collector Base Model for PVT System / K.A. Minakova, R.V. Zaitsev // Journal of nano- and electronic physics. – 2020. – Vol. 12. – No 4. – P. 04028-1 – 04028-5.

УДК 621.311

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ГЕНЕРАЦІЮ СЕС

Мороз О.М., Мірошник О.О., Павлов А.О., Мішин А.С.

*Державний біотехнологічний університет, Україна, м. Харків*

Основним недоліком сонячних електростанцій (СЕС) є їх залежність від метеопараметрів [1] і місця їх розташування [2], внаслідок чого їх прогнозна генерація має значні відхилення від фактичної генерації. Так за 7 місяців 2021 року середній показник відхилення фактичного виробітку електроенергії з промислових СЕС України від їх прогнозованих обсягів склав 36,49% [3]. Одним із факторів, який має суттєвий вплив на генерацію СЕС, є азимут розміщення фотоелектричних модулів (ФЕМ) та азимут сонця впродовж року.

Для визначення впливу азимуту сонця на генерацію електричної енергії СЕС потужністю 2,4 МВт, координати розміщення якої 49.80 п.ш., 36.08 с.д. були проведені дослідження за допомогою сервісу EU Science Hub [4]. Фотоелектричні модулі СЕС мають оптимальну орієнтацію 180 градусів на південь і мають кут нахилу поверхні 27 градусів.

Результати досліджень впливу азимуту впродовж року на генерацію СЕС наведені на рис. 1. Азимуту в 0° відповідає розміщення сонця на півдні.

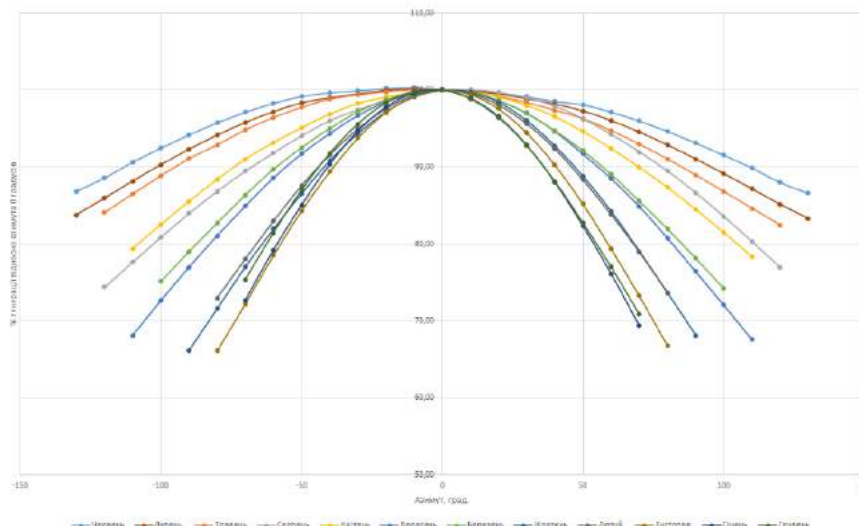


Рисунок 1 – Результати досліджень помісячного впливу азимуту впродовж року на генерацію СЕС

З аналізу графіків можна зробити такі висновки: взимку при зміні азимутів до  $\pm 80^\circ$  генерація зменшується до 30%; весною при зміні азимутів  $\pm 100^\circ$  у березні генерація зменшується до 25%, в той час як для травня при зміні азимуту  $\pm 120^\circ$  генерація зменшується до 18%; влітку у серпні при зміні азимуту  $\pm 120^\circ$  генерація зменшується до 25%, у червні та липні при зміні азимуту  $\pm 130^\circ$  генерація у червні зменшується до 14%, а у липні до 17%; в осінні місяці при

зміні азимуту від  $\pm 110^\circ$  до  $\pm 80^\circ$  відповідно у вересні та листопаді генерація зменшується до 33%.

Також були проведені експериментальні дослідження впливу кута падіння променів сонця на ФЕМ в залежності від азимуту сонця. Було встановлено що при азимуту  $270^\circ$  (сонце знаходиться на сході) промені сонця паралельні поверхні модулів. При азимуту менших  $270^\circ$  сонце знаходиться з тильної сторони ФЕМ і тому генерація електричної енергії відбувається тільки за рахунок розсіяного сонячного світла. На рис. 2 зображена характеристика активної потужності СЕС 13 червня 2021 року. В момент часу 6:36 азимут сонця буде  $270^\circ$ , після цього моменту спостерігається зміна інтенсивності активної потужності. Подібна ситуація відбувається і при заході сонця. Тому модель прогнозування генерації СЕС до періодів коли сонце має азимут більше  $270^\circ$  або більше  $90^\circ$  повинна враховувати ці фактори.

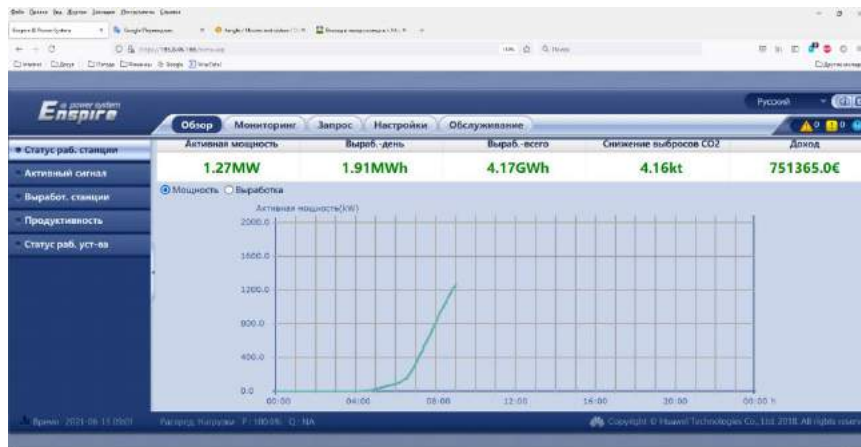


Рисунок 2 – Графік активної потужності СЕС 2,4 МВт 13.06.2021 року

Отримані залежності дозволяють враховувати вплив азимуту сонця відносно поверхні фотоелектричних панелей та підвищити точність прогнозування генерації СЕС.

### Список використаних джерел:

1. Лежнюк П. Д. Аналіз метеопараметрів для погодинного прогнозування виробітку електроенергії фотовольтаїчними електростанціями на добу наперед / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, Є. С. Дідіченко // Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. – 2017. – № 1. – С. 27-31. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ekit\\_2017\\_1\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ekit_2017_1_8).
2. A. K. Yadav, H. Malik, S. S. Chandel, I. A. Khan, S. A. Otaibi and H. I. Alkhamash, "Novel Approach to Investigate the Influence of Optimum Tilt Angle on Minimum Cost of Energy-Based Maximum Power Generation and Sizing of PV Systems: A Case Study of Diverse Climatic Zones in India," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 110103-110115, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3102153.
3. Виробники з ВДЕ відхилились від прогнозу. – Режим доступу: <https://cutt.ly/YRt2qDU>.
4. EU Science Hubю. – Режим доступу: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/#MR](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR).

УДК 537.315:006.9

**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ У  
ВІДПОВІДНОСТІ ДО ГОСТ 13109-97 ТА ДСТУ EN 50160:2014****Ніконов М.С., Петровський М.В., Дяговченко І.М.***Сумський державний університет, м. Суми*

Робота потужних споживачів: плавильних печей, перетворювачів частоти і навіть побутових приладів істотно впливають на форму сигналу напруги, яка характеризується коефіцієнтом  $n$ -ої гармонічної складової напруги й коефіцієнтом викривлення синусоїдальної кривої напруги. Відхилення таких показників якості електроенергії від допустимих значень, впливає на роботу, а також на технічний стан силового обладнання та пристроїв побудованих на основі мікропроцесорів та мікроконтролерів. У зв'язку із цим, уточнення алгоритмів для визначення показників якості електроенергії являється актуальною задачею.

Для виміру та розрахунку даних показників існує певний перелік нормативних документів. Основним діючим документом є ГОСТ 13109-97, але додатково також було прийнято ДСТУ EN 50160:2014. Рекомендації щодо визначення та розрахунку параметрів якості електроенергії в них відрізняються. Основною різницею є інтервал усереднення часу для визначення показників несинусоїдальності. Розрахунок коефіцієнта  $n$ -ої гармонічної складової напруги  $K_{(n)i}$  та коефіцієнта викривлення синусоїдальної кривої напруги  $K_U$  здійснюється у відсотках як результат усереднення спостережень за інтервал часу  $T$  рівний 3 секунди та 10 хвилин, відповідно до ГОСТ 13109-97 та ДСТУ EN 50160:2014.

Також постає питання про визначення частоти та амплітуди існуючих гармонічних складових в сигналі включно до 40 гармоніки. Для їх визначення рекомендується використовувати дискретне перетворення Фур'є. Оскільки, розрахунок здійснюється дискретним перетворенням Фур'є, то у випадку, коли період сигналу не буде кратний відстані між дискретними відліками сигналу треба використовувати додаткові методи для визначення частоти та амплітуди гармонік сигналу.

Слід зазначити, що інтервали усереднення, а саме, період дискретизації Фур'є, спектру дискретного перетворення Фур'є, необхідно брати у відповідності з ДСТУ EN 61000-4-30:2010. Даний документ регулює інтервали усереднення досліджуваного сигналу для розподільчих електричних мереж України частотою 50 Гц. Так, для такої частоти інтервал часу має складати 10 періодів, тобто 0,2 с.

Розроблена в роботі методика, що спирається на значені вище документи дозволяє визначати коефіцієнти несинусоїдальності дискретно вимірної напруги. Порівняння результатів розрахунків за ГОСТ 13109-97 та ДСТУ EN 50160:2014, дозволяє зробити висновок, що результат із меншим інтервалом усереднення 3 сек., дає більш точні значення про гармонійний склад вимірною сигналу, коли тривалість збурень є короткою у часі – на рівні декількох секунд та менше.

УДК 621.315.2.016.2

## ОСОБЛИВОСТІ ДІАГНОСТИКИ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ ПАПЕРОВО-ПРОСОЧЕНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ У ВИСОКОЧАСТОТНОМУ ДІАПАЗОНІ

Москвітін Є.С.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Для визначення тангенсу кута діелектричних втрат  $tg\delta$  у високочастотному діапазоні застосовується частотно-резонансний метод вимірювання добротності за допомогою куметру. Куметр дозволяє вимірювати добротність, а також  $tg\delta$  та ємність кабелю. Але такий метод вимірювання  $tg\delta$  має недоліки, одним з яких є обмежений діапазон значень ємності: при значних значеннях ємності кабелю неможливо досягнути резонансу частоти. Так, схема обстеження три жили проти металеві оболонки силового кабелю з паперово-просоченою ізоляцією (рис. 1,а) унеможливує забезпечення резонансу між значною ємністю об'єкту контролю та котушкою індуктивності куметру. Діагностику за тангенсом кута діелектричних втрат у високочастотному діапазоні можливо реалізувати тільки в лабораторних умовах на коротких зразках кабелів та за схемою обстеження, подібної до наведеної на рис. 1,б: кожна із ізольованих жил проти іншої.

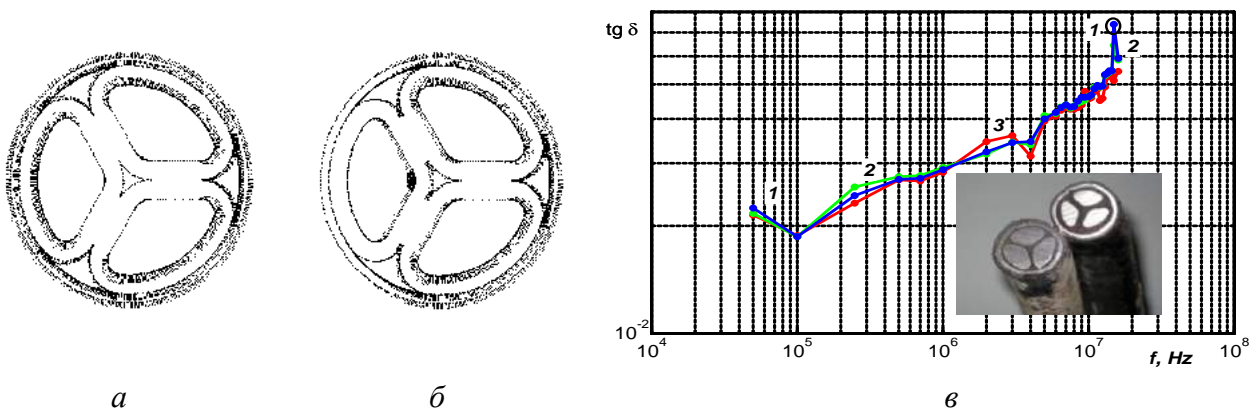


Рисунок 1 – Структура зондувального поля (а, б) та частотні залежності в широкому діапазоні частоти тангенсу кута діелектричних втрат паперово-просоченої ізоляції (в) силового кабелю ААШВ на напругу 6 кВ

На рис. 1,в представлені результати діагностики ізоляції кабелю за схемою рис. 1,б. На частоті близько 15 МГц проявляється пік значень  $tg\delta$ , що відповідає наявності вологи в ізоляції, причому висота піку різна для однієї із обстежених фаз. Це може свідчити про несиметричність струмового навантаження кабелю в процесі експлуатації та нерівномірність старіння ізоляції, пов'язаною із втратою зв'язаної вологи в структурі целюлози.

УДК 621.311

**ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ****Олійник Ю.С.***Українська інженерно-педагогічна академія, Україна, м. Харків*

Збереження паливно-енергетичних ресурсів є одним з найважливіших та найголовніших завдань сьогодення. Сучасне суспільство споживає все більше енергії, що пов'язано з ростом чисельності жителів Землі, модернізацією оснащення їхніх помешкань, а також з нарощуванням масштабів промислового виробництва. У той же час через обмеженість запасів невідновлюваних енергетичних ресурсів (нафти, вугілля і газу) людство змушене поступово переходити до розробки найменш доступних з них, що позначається на вартості видобутку, а в результаті - на тарифах для кінцевих споживачів.

Під енергозбереженням розуміється реалізація правових, організаційних, наукових, виробничих, технічних і економічних заходів, спрямованих на ефективне використання паливно-енергетичних ресурсів, під якими ми розуміємо сукупності природних і виробничих енергоносіїв, запасені енергія яких при існуючому розвитку техніки і технології доступна для використання в господарській діяльності, і на залученні в господарський оборот відновлюваних джерел енергії.

Ефективність використання енергії є свого роду індикатором науково-технічного та економічного потенціалу суспільства, що дозволяє оцінювати рівень його розвитку. Співставлення показників енергоефективності економіки України з розвиненими країнами показує, що питома енергоємність нашого валового внутрішнього продукту (ВВП) в кілька разів вище, ніж в розвинених країнах. Це в свою чергу свідчить про значні резерви економії енергоресурсів в Україні, масштаби яких можна оцінити приблизно в 40-50% від рівня споживаних палива і енергії [3-5].

Складне становище економіки України, в якому опинилася і вітчизняна енергетика, в найближчому майбутньому може привести до глибокого енергетичної кризи, яка зведе нанівець всі зусилля але реформування економіки, зупинить намічені тенденції в пожвавленні промисловості.

Також несприятлива картина склалася, зокрема, і в системах теплопостачання. Як показує практика «наскрізного» аудиту, більше 30% потенціалу економії енергії зосереджено в системах інженерного обладнання, до 70% економії енергії може бути отримано безпосередньо в будівлях і спорудах.

Цілеспрямована реалізація програм енергоресурсозбереження дозволила б при значно менших, ніж для введення нових енергетичних потужностей, капітальних витратах, зменшити дефіцит енергії і створити сприятливі умови для вирішення проблеми в паливно-енергетичному комплексі.

Цілеспрямована реалізація програм енергозбереження, перш за все, в промисловості, житловому комплексі та на транспорті, дозволила б при значно

менших, ніж для введення нових енергетичних потужностей, капітальних витратах зменшити дефіцит енергії і створити сприятливі умови для вирішення проблем в паливно-енергетичному комплексі [2-4].

Скорочення енергетичних природних запасів ставить гостро проблему енергозбереження і підвищення енергоефективності будівель. Вирішення цієї проблеми тісно пов'язане з підвищенням вимог до якості проектування будівель, оскільки помилки проектування призводять до зниження теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій і підвищують енерговитрати на експлуатацію будівлі [1].

В сучасних умовах однією із актуальних проблем, які поставлено перед державою, є зниження кількості електричної енергії, яка споживається, та більш оптимальне використання енергетичних ресурсів.

Для досягнення цього необхідно використовувати передові енергозберігаючі технології в комплексі та здійснювати втілення організаційних заходів, які направлені на енергозбереження. Багато розвинених країн збільшився рівень економічних процесів завдяки оптимізації в енергетичній галузі. Це вдалося здійснити за рахунок втілення та подальшого ефективного використання енергозберігаючих технологій та заходів.

Отже, актуальність процесу енергозбереження не має сумніву. Процес енергозбереження стає дедалі актуальним. Енергозберігаючі заходи є необхідною складовою реалізації програм енергозбереження, що в свою чергу дозволить зменшити споживання паливно-енергетичних ресурсів та знизити рівень забруднення оточуючого середовища.

#### **Список використаних джерел:**

1. Олейник Ю.С., Траскевич В.Н. Проблемы энергосбережения на промышленных предприятиях / Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Європейська наука XII століття-2017», 07-15 травня 2017 року. Секція: технічні науки. Том 11. – С. 13–18.
2. Олійник Ю.С. Управління енергозбереженням та енергоспоживанням на промислових та господарських підприємствах / News of Science and Education. – Т. 4. – Вип. 11. – 2017. – С. 10–12.
3. Олійник Ю.С. Енергетична ефективність на промислових підприємствах / Materials of the XIII International scientific and practical Conference “Trends of modern science-2017”, 30 may-07 June 2017. – Vol. 15: Technical science. Sheffield. – P. 46–48.
4. Олійник Ю.С. Сучасні підходи у напрямку енергозбереження. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – Вип. 204 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2019. – С. 58–60.
5. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters / P. Budanov, K. Brovko, A. Cherniuk, I. Pantielieieva, Yu. Oliynyk, N. Shmatko, P. Vasyuchenko // Eastern-european journal of enterprise technologies. – 2018. – № 5/5 (95). – P. 20–28.

УДК 621.316

**АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ МІСЦЕВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ****Перепечений В.О.***Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова, Україна, м. Харків*

Електромережевий комплекс (ЕМК) являє собою складну організаційно-технічну систему. Починаючи з 2000-х років в електроенергетиці України, у тому числі й в ЕМК, запущений процес реформування.

Поява нових технологій, що впливають на структурну й функціональну надійність живильних і розподільних мереж, привело до виникнення нових завдань, що не мають на справжній момент універсальних методичних рішень. Для вивчення впливу нових технологій на надійність електричних мереж потрібне вдосконалювання існуючих і розробка нових моделей і методів оцінки й аналізу надійності, що враховують їхні особливості функціонування й вплив на систему електропостачання.

При аналізі надійності, місцеві електричні мережі слід розглядати дві складові:

- електрична мережа, котра є сукупністю установок і пристроїв, що утворює електричне коло, яке відповідає технічним вимогам до значень напруги у вузлах і електричного струму в гілках, які встановлені технічною документацією по експлуатації об'єктів ЕМК. До складу електричної мережі відносять об'єкти для передачі електричної енергії, перетворювачі електроенергії, системи релейного захисту й автоматики;

- підсистема системи електропостачання, яка складається з електроустановок і електричних пристроїв, призначених для виробництва, передачі й розподілу електричної енергії.

При аналізі надійності електричної мережі, необхідно проводити аналіз як з позиції структурної, так і функціональної надійності.

Під структурною надійністю розуміють властивість системи перебувати в працездатному стані, тобто згідно [1, 2], у такому стані, у якому мережа здатна виконувати задані функції у певних умовах функціонування. Дана властивість надійності дозволяє оцінювати технічний стан мережі.

Роль мережі, як підсистеми електропостачання, відбиває функціональну надійність як властивість системи перебувати в робочому стані, що згідно [1] означає знаходження в стані, у якому мережа виконує необхідну функцію, тобто здійснює передачу й розподіл електричної енергії й потужності. При цьому важливо відзначити, що система, що перебуває в працездатному стані, може перебувати як у робочому, так і неробочому стані.

Для електротехнічного устаткування, що утворює ЕМК, з позиції надійності найбільш істотними процесами є: функціонування й цілеспрямована зміна

об'єкта, взаємодія із середовищем, старіння, будівні й ремонтні впливи [3]. У результаті накладення цих процесів один на одного та їх взаємодії виникають певні події, і об'єкт приймає різні стани, що істотно впливають на виконуваним функції. До них відносяться події: «відмова» і «відновлення», й стани: «працездатний» і «непрацездатний».

Заміщення вертикально-інтегрованого принципу побудови енергетики на функціональний у сукупності із проведенням приватизації та установленням ринкових відносин, на думку багатьох експертів привело до того, що сьогодні електромережевий комплекс працює на межі надійності. Частка електричних мереж розподільного ЕМК, що відпрацювали свій нормативний строк, а деякі 2 нормативних строки. Загальне зношування електричних мереж досягає 85 %.

Очевидно, що основне електротехнічне встаткування, що відпрацювало свій нормативний термін служби, уступає сучасним аналогам за технічними характеристиками, масо-габаритними показниками і показниками надійності. При цьому застаріле обладнання вимагає витрат, що збільшуються з ростом строку, на технічне обслуговування й ремонт.

У цілому сформований стан не можна вважати задовільним, воно не дозволяє електричній мережі повною мірою відповідати вимогам за структурною, а, отже, і функціональної надійності. При цьому підвищити рівень надійності мережі за рахунок реалізації заходів тільки технічного обслуговування й ремонту неможливо. Необхідно здійснювати заходи технічного переозброєння й реконструкції, головним чином орієнтовані на освоєння нових технологій.

#### **Список використаних джерел:**

1. Фокин Ю.А. Надежность и эффективность сетей электрических систем / Ю.А. Фокин. – Москва: Высшая школа, 1989. – 151 с.
2. Зорин В.В. Надежность системы электроснабжения / В.В. Зорин, В.В. Тисленко, Ф. Клеппель, Г. Адлер. – Киев: Вища школа, 1984. – 192 с.
3. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю.Б. Гук. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 206 с.

УДК 621.311

**АНАЛІЗ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ОБ'ЄКТАХ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ****Піротті О.Є., Гузін М.Ю.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Актуальність аналізу і розробки заходів, спрямованих на недопущення технологічних порушень та аварійності, полягає в тому, що однією з найбільших техногенних загроз для населення і навколишнього середовища є об'єкти підвищеної небезпеки, до яких відносяться в тому числі й енергооб'єкти [1]. Аварії на цих об'єктах, у тім числі пожежі, вибухи, витікання небезпечних речовин, можуть призвести не тільки до ураження людей сильнодіючими отруйними речовинами, а й до негативного впливу на навколишнє середовище. У зв'язку з цим питання оцінки небезпеки та існуючих на підприємстві ризиків виникнення аварій, їх практичне прогнозування та розробка заходів із запобігання виникненню та розвитку з метою забезпечення стійкого функціонування об'єктів енергетичної галузі, складання декларації безпеки, обґрунтування управлінських рішень щодо зниження небезпеки та запобігання аварійним ситуаціям є актуальними для енергетики.

Аварійна ситуація – це стан потенційно небезпечного об'єкту, що характеризується порушенням меж або умов безпечної експлуатації, але не перейшов в аварію. При виникненні такого стану на енергетичному об'єкті всі несприятливі впливи джерел небезпеки на персонал, населення та навколишнє середовище утримуються у прийнятних межах за допомогою відповідних передбачених технічних засобів. При цьому необхідно прогнозувати і оцінювати обстановку в зоні аварійної ситуації та можливості підрозділів, що залучаються до виявлення, локалізації та ліквідування аварійної ситуації.

При виникненні такої аварійної ситуації особливо важливим є аналіз основних процесів, що мають місце під час дії вражаючих чинників на об'єкт в цілому та його окремі елементи, на засоби контролю параметрів енергооб'єкту [2]. Ці процеси безпосередньо повинні враховуватись при визначенні як заходів щодо локалізації і усунення аварійної ситуації, так і при визначенні засобів захисту працівників. На основі зафіксованих технологічних порушень, що спричинили аварійні ситуації на підстанціях 35-110 кВ міста Харкова в період 2018-2019 рр., був виконаний аналіз небезпечних чинників і ризику при експлуатації досліджуваних об'єктів. Аварійні ситуації були поділені за кваліфі-

каціями і причинами виникнення. Серед причин досліджуваних аварійних ситуацій найбільш поширеними є:

- поганий контакт кабельного наконечника або кабельної воронки (понад 18%);
- пошкодження кабельної муфти в кабельному відсіку (понад 10%);
- попадання тварин (птиць) на електрообладнання (понад 25%);
- старіння силового обладнання через перевищення терміну його експлуатації понад нормований (понад 27%).

Для кожної з виділених груп були запропоновані найбільш доцільні заходи щодо запобігання аварійної ситуації, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення методики розробки заходів щодо запобігання аварій на об'єктах підвищеної небезпеки.

#### **Список використаних джерел:**

1. Нечаєва Т.П., Шутьженко С.В., Сас Д.П., Парасюк М.В. Фактори екологічного впливу електроенергетичних об'єктів на довкілля / Проблеми загальної енергетики. – 2008. – № 18. – С. 54–60.
2. Про затвердження Інструкції про розслідування і облік технологічних порушень на об'єктах електроенергетики і в об'єднаній енергетичній системі України. Затверджено Міністерством палива та енергетики України, наказ № 255 від 09.06.2005 р.

УДК 621.315.615.2

**АНАЛІЗ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ПРОБИВНОЇ НАПРУГИ МАСЛА  
В АВТОТРАНСФОРМАТОРАХ 330 КВ****Пономаренко С.Г.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Силовий трансформатор вважається однією з найважливіших частин системи передачі та розподілу електроенергії. Стан силових та розподільних трансформаторів необхідно контролювати, щоб гарантувати надійність електросистеми. Оцінка різних параметрів трансформаторного масла має життєво важливе значення для визначення стану випробуваного трансформатора. Удосконалення методів оцінки стану трансформаторних масел є актуальним завданням. В даній роботі наводяться результати аналізу законів розподілу пробивної напруги для придатного та непридатного до експлуатації трансформаторного масла по 49 автотрансформаторів 330 кВ. Для зниження неоднорідності результатів періодичних випробувань був використаний алгоритм статистичної обробки, заснований на перевірці трьох статистичних гіпотез: про рівність математичних очікувань, про рівність дисперсій і схожості законів розподілу.

Алгоритм статистичної обробки результатів випробувань пробивної напруги був реалізований у вигляді авторської програми «ODNORODN» [1], яка дозволяє істотно скоротити необхідний час для статистичної обробки вихідних даних та підвищити точність розрахунків. Використання даної програми стосовно аналізованої вибірки даних дозволило сформулювати кілька масивів показників з близькими значеннями вибірових середніх, вибірових дисперсій і подібними законами розподілів.

Виконаний аналіз, показав, що отримані однорідні масиви сформовані за результатами випробувань автотрансформаторів, що мають близькі терміни експлуатації і схожі значення коефіцієнтів навантаження. Це дозволило в подальшому встановити однозначний зв'язок між умовами експлуатації трансформаторів і значеннями параметрів законів розподілу.

Для перевірки гіпотези про відповідність теоретичного закону розподілу емпіричним даним була використана програма «ZR» [1]. Після чого за вибіровим значенням виконується оцінка параметрів для таких законів розподілу: нормальний, бета-розподіл, експоненційний, екстремальний, гамма-розподіл, Лапласа, логістичний, логарифмічний нормальний, Релея, Вейбула та Парето. Для кожного з 11 законів розподілу виконується перевірка відповідності теоретичного закону розподілу емпіричним даним. Для цього використовувалися два статистичних критерії: критерій Пірсона та критерій Колмогорова-Смирнова. Виконаний за допомогою програми аналіз показав, що значення показників масла як придатного, так і непридатного до експлуатації можуть бути описані ро-

зподілом Вейбула. Значення параметрів закону розподілу Вейбула, а також розрахункові і критичні значення критеріїв Пірсона і Колмогорова-Смирнова для пробивної напруги масла непридатного та придатного до експлуатації в автотрансформаторів напругою 330 кВ наведені в табл. 1.

Таблиця –1 Значення параметрів закону розподілу Вейбула, а також розрахункові і критичні значення критеріїв Пірсона і Колмогорова-Смирнова для пробивної напруги масла непридатного та придатного до експлуатації в автотрансформаторів напругою 330 кВ

Масив	Параметри закону розподілу		Значення критерію Пірсона			Значення критерію Колмогорова-Смирнова
	$\alpha$	$\beta$	f	$\chi^2_{calc.}$	$\chi^2_{crit.}$	$\lambda_{calc.}$
Непридатне до експлуатації трансформаторне масло						
D <sub>2</sub>	0.1445	9.955	4	7.427	9.49	0.704
Придатне до експлуатації трансформаторне масло						
D <sub>11</sub>	77.523	11.48	3	5.235	7.82	0.890
D <sub>12</sub>	71.499	11.24	4	8.207	9.49	0.893
D <sub>13</sub>	70.319	9.612	4	2.768	9.49	0.260
D <sub>14</sub>	69.855	8.038	4	9.229	9.49	0.754
D <sub>11</sub>	77.523	11.48	3	5.235	7.82	0.890

Аналіз отриманих результатів. За аналогією з [2] був виконаний аналіз взаємного розташування теоретичних щільності розподілу пробивної напруги трансформаторних масел придатних і непридатних до експлуатації в автотрансформаторах напругою 330 кВ. Як приклад на рис. 1 наведено щільності теоретичних розподілів для пробивна напруга масла.

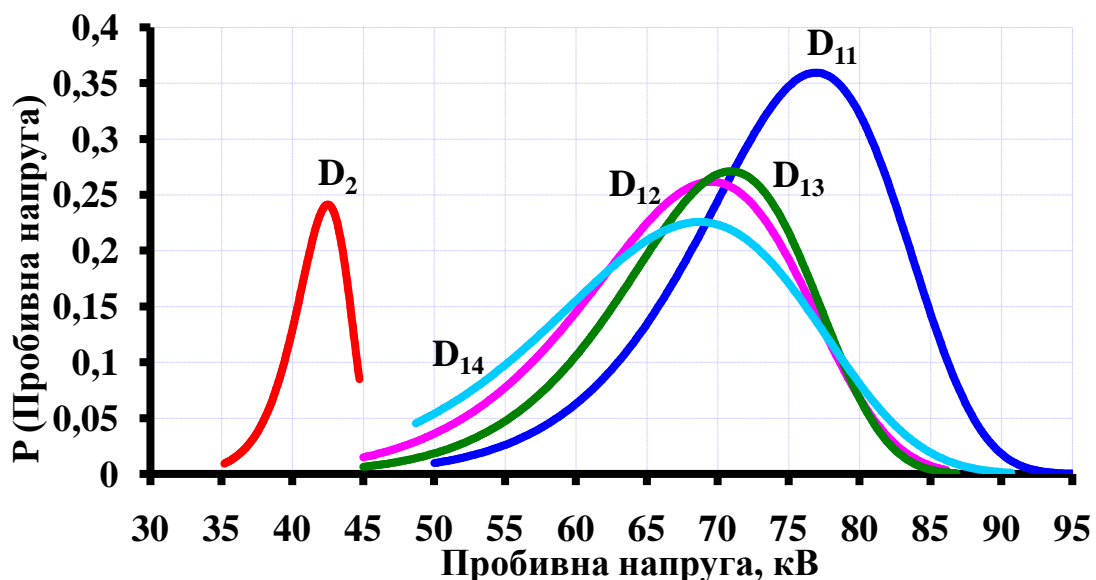


Рисунок 1 – Функції щільності теоретичного розподілу пробивної напруги масел для автотрансформаторів напругою 330 кВ

Для автотрансформаторного масла придатного до експлуатації спостерігається зміщення математичних очікувань щільності розподілів для різних масивів пробивної напруги. Це свідчить про різний ступінь старіння масел, яка обумовлена різним терміном експлуатації масла, різними значеннями робочої температури трансформаторів, а також впливом конструкційних матеріалів. Аналізуючи взаємне розташування щільності розподілу показників масла придатного до експлуатації для автотрансформаторів напругою 330 кВ можна прийти до висновку, що дані розподілу так само зміщені один щодо одного. Виконаний аналіз показав наявність істотного зміщення між математичними очікуваннями розподілів масла придатного і непридатного до експлуатації, це означає, що залишковий ресурс масел в трансформаторах, що аналізуються суттєво різниться.

Отримані значення параметрів законів розподілу показників трансформаторних масел дозволяють скорегувати гранично - допустимі значення показників ізоляції трансформаторних масел при розробці моделей для оцінки відпрацьованого ресурсу масел, з використанням методів статистичних рішень. Як показано в [3-5] таке коригування дозволить значно знизити ризики прийняття хибних рішень та підвищити експлуатаційну надійність автотрансформаторів.

#### **Список використаних джерел:**

1. Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных / О.В.Шутенко, Д.Н. Баклай // Учеб. пособие для вузов. – Харьков.: НТУ «ХПИ», 2013. – 268 с.
2. O. Shutenko, S. Ponomarenko Analysis of distribution laws of transformer oil indicators in 110-330 kV transformers / Electrical Engineering & Electromechanics. – 2021. – № 5. – PP. 46–56. DOI: 10.20998/2074-272x.2021.5.07.
3. O. Shutenko, S. Ponomarenko Using Statistical Decision Methods to Correct the Maximum Permissible Values of Transformer Oils Indicators / 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – IEEE, 2021. – PP. 471–476. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570041.
4. O. Shutenko, S. Ponomarenko Correction of the Maximum Permissible Values of the Oil Acidity by the Minimum Risk Method / 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) – IEEE, 2021. – PP. 310-315. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575854.
5. Шутенко О.В., Пономаренко С.Г. Коригування гранично-допустимих значень пробивної напруги трансформаторних масел методом мінімального ризику. / Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність: зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т», Харків: НТУ «ХПИ». – 2020. – № 1. – С. 106–115.

УДК 621.316.1:62-97/-98

## РОЗРОБКА БЛОК-СХЕМ АЛГОРИТМІВ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ВПЛИВУ НА СИНУСОЇДНІСТЬ НАПРУГИ НИЗЬКОВОЛЬТНОЇ МЕРЕЖІ

Потикун Н.Ю.<sup>1</sup>, Трунова І.М.<sup>2</sup><sup>1</sup> АТ «Харківобленерго», Україна, м. Харків<sup>2</sup> Державний біотехнологічний університет, Україна, м. Харків

Для підвищення енергоефективності та енергетичної безпеки електроенергетичних систем необхідно підтримувати якість електроенергії відповідно до ДСТУ EN50160:2014 [1], де приведені основні характеристики напруги, в тому числі ті, що стосуються синусоїдності напруги. Для використання комп'ютерних технологій на основі створених масивів даних, в тому числі з Планів розвитку систем розподілу, зокрема [2], були розроблені блок-схеми алгоритмів розрахунків для визначення об'єктів впливу на синусоїдність напруги. Наприклад, спрощена блок-схема алгоритму розрахунків для визначення впливу на синусоїдність напруги нових електроустановок споживачів, які планують приєднувати до електромережі низької напруги (НН), представлена на рис. 1.

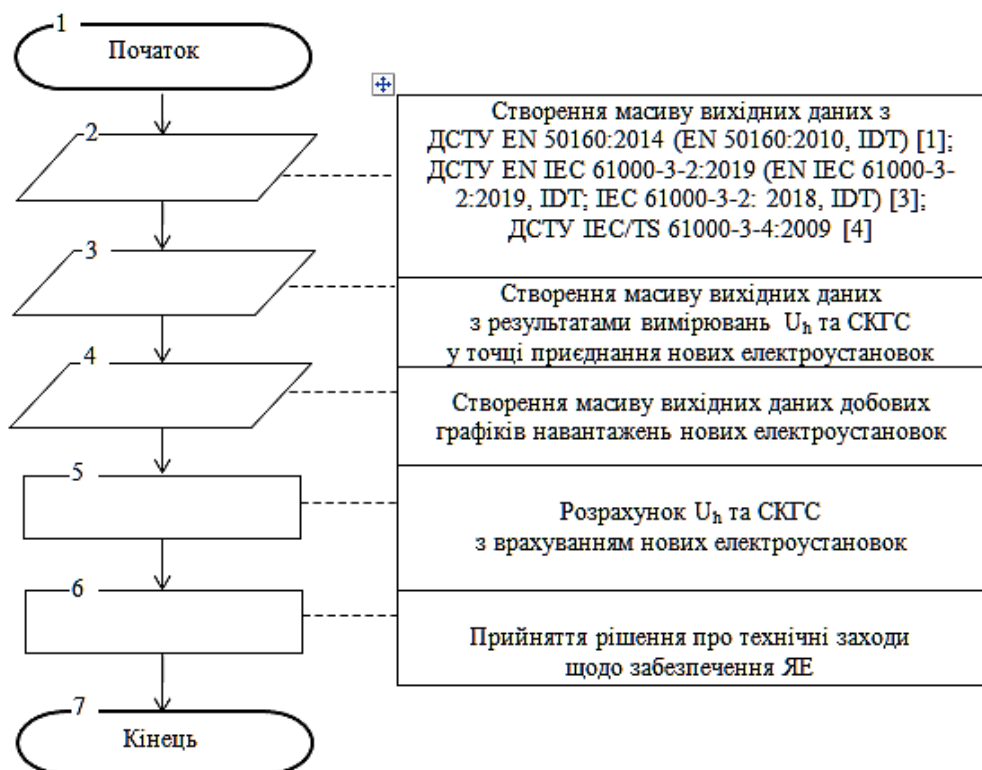


Рисунок 1 - Спрощена блок-схема алгоритму розрахунків для визначення впливу на синусоїдність напруги нових електроустановок споживачів, які планують приєднувати до електромережі НН

Однак, в процесі експлуатації електроустановки споживачів можуть змінювати технічні характеристики і порушувати норми на емісію гармонік. Також є електроустановки хоча і з нелінійною вольт-амперною характеристикою, але з малої сумарною потужністю, впливом яких на синусоїдність напруги в експлуатації нехтують. Тому за результатом моніторингу за  $U_h$  та СКГС, якщо вони вийшли (або наближаються) до граничних значень, можна виявити найбільш суттєві об'єкти впливу на синусоїдність напруги за методикою, що наведена у стандарті СОУ-Н ЕЕ40.1-37471933-55:2011 [5]. Запропонована типова блок-схема алгоритму розрахунків для виявлення об'єктів у мережі НН, де враховані такі вихідні дані, як дозволена потужність об'єкта ( $S_{\text{дозв}}$ ); найменша потужність короткого замикання у точці загального приєднання ( $S_{\text{кз нн}}$ ); сумарна встановлена потужність електроустановок з нелінійною вольт-амперною характеристикою ( $S_{\text{сномв}}$ ). Відповідний аналіз базується на таких умовах з [5]:

- якщо  $a \leq 0,2$ , то електроустановки споживача не впливають на синусоїдність напруги в точці загального приєднання,  $a$  визначається за виразом

$$a = \frac{S_{\text{дозв}}}{S_{\text{кз нн}}} \cdot 100; \quad (1)$$

- якщо  $a_1 > 0,2$ , то електроустановки споживача впливають на синусоїдність напруги в точці загального приєднання,  $a_1$  визначається за виразом

$$a_1 = \frac{S_{\text{сномв}}}{S_{\text{кз нн}}} \cdot 100. \quad (2)$$

### Список використаних джерел:

1. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) [Чинний з 1.10.2014]. – К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.
2. План розвитку системи розподілу АТ «Харківобленерго» на період 2022-2026 рр. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.oblenergo.kharkov.ua/sites/default/files/pdf/prsr\\_22-26\\_at\\_harkivoblenergo.pdf](https://www.oblenergo.kharkov.ua/sites/default/files/pdf/prsr_22-26_at_harkivoblenergo.pdf) (дата звертання: 11.10.2020).
3. Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми емісії гармонійних складників струму (обладнання із силою вхідного струму не більше ніж 16 А в одній фазі): ДСТУ EN ІЕС 61000-3-2:2019 (EN ІЕС 61000-3-2:2019, IDT; ІЕС 61000-3-2: 2018, IDT) [Чинний з 07.08.2019]. – ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 25 с.
4. Електромагнітна сумісність. Частина 3-4. Норми. Унормування емісії струмів гармонік у низьковольтних системах електропостачання для обладнання з номінальною силою споживаного струму понад 16 А: ДСТУ ІЕС/TS 61000-3-4:2009 (ІЕС 61000-3-4:1998, IDT) [Чинний з 01.01.2012]. – К.: Держстандарт України, 2014. – 17 с.
5. Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення: СОУ-Н ЕЕ40.1-37471933-55:2011. [Чинний з 31.10.2011]. – К.: Міненерговугілля, 2012. – 98 с.

УДК 621.315.2

**КАБЕЛІ МЕРЕЖ ПРОМИСЛОВОГО ETHERNET****Пушкар О.А.***ТОВ «Алай», Україна, м. Київ*

Кожне промислове підприємство сприяє автоматизації як окремих технологічних процесів, так і всього виробництва в цілому. Для цього необхідно ввести всі активні та пасивні пристрої в єдину інформаційну промислово-технологічну мережу, де взаємодія між пристроями відбувається за допомогою програмно-логічних протоколів зв'язку. Промислові мережі, зазвичай, не виходять за межі одного підприємства. Протягом останніх 10 років чисельність промислових мереж зросла більше, ніж в 2 рази. До 2025 року очікується зростання на 280% в порівнянні з 2010 роком. На фізичному рівні всі промислово-технологічні мережі (FieldBus Profibus, LonWorks та інші) базуються на витій парі або оптичному волокні, причому в більшій мірі застосовуються рішення на основі електричних кабелів.

Для кабелів на основі витих пар промислових мереж застосовують ту ж класифікацію, що і для інформаційних локальних мереж. У міру модернізації мереж, яка передбачає перехід від застарілої польової шини до промислового (Industrial) Ethernet, комунікаційна кабельна інфраструктура стає основою підключення до комунікацій промислового підприємства. Існуючі технології фізичного рівня Industrial Ethernet на витій парі мають обмеження відстані, на яку передається сигнал, – не більше 100 м. У зв'язку з тим, що для додатків автоматизації процесів потрібні відстані 1 км та навіть більше у поєднанні з надійними польовими пристроями, придатними для використання в додатках зони 0 (іскробезпечні), знадобився новий підхід до реалізації технології фізичного рівня Ethernet. Новий стандарт 10BASE-T1L фізичного рівня промислового Ethernet (IEEE 802.3cg-2019 (табл. 1) кардинально дозволяє змінити галузь автоматизації процесів за рахунок значного підвищення операційної ефективності підприємства, в тому числі і електроенергетичного напрямку, завдяки організації високонадійного безшовного (без використання шлюзів) підключення до Ethernet на польовому рівні, яке передбачає найрізноманітніші пристрої, в тому числі датчики і виконавчі механізми – актуатори, програмовані логічні контролери (рис. 1).

Стандарт 10BASE-T1L підтримує два режими амплітуди сигналу: 2,4 В на довжині кабелю до 1000 м і 1 В на меншій відстані. Режим повної амплітуди 1 В означає, що цю нову технологію фізичного рівня можна використовувати і у вибухозахищених (Ex-proof) системах, дотримуючись строгих правил щодо обмеження максимальної енергії. Найголовнішим є те, що стандарт 10BASE-T1L забезпечує передачу на великі відстані завдяки двохпровідній технології з живленням і даними по одному кабелю у вигляді витій пари і належить до сімейства середовищ з однопарним Ethernet (single-pair Ethernet, SPE) (табл. 1).

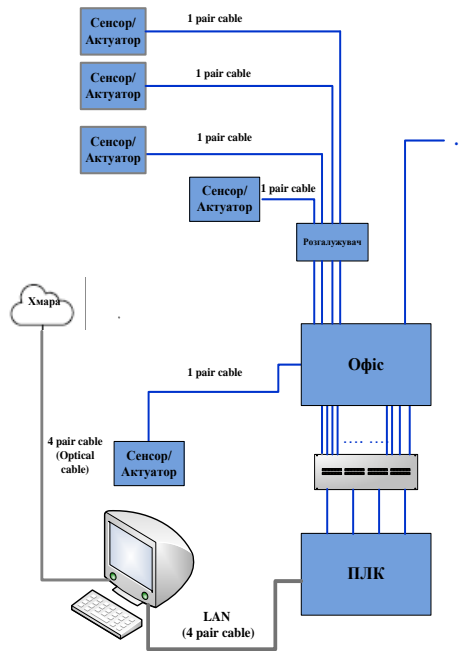


Рисунок 1 – Один з можливих варіантів реалізації мережі промислового Ethernet із застосуванням на фізичному рівні оптичного кабелю, 4-х парних кабелів на основі витної пари та однопарної екранованої витної пари (SPE)

Таблиця 1 – Міжнародні стандарти та категорії кабелів на основі витих пар для промислових мереж Ethernet [1]

Рік прийняття стандарту	Стандарт IEEE 802.3		Максимальна відстань передачі сигналів, м	Швидкість передачі сигналів	Смуга пропускання кабелю на основі витної пари	Категорія кабелю відповідно до рекомендацій ISO/IEC	Кількість пар
1999	IEEE 802.3ab	1000BASE-T	100	1 ГБіт/с	125 МГц	Категорія 5e	4
2006	IEEE 802.3an	10GBASE-T	55	10 ГБіт/с	250 МГц	Категорія 6	4
2006	IEEE 802.3an	10GBASE-T	100	10 ГБіт/с	500 МГц	Категорія 6	4
2006	IEEE 802.3an	10GBASE-T	100	10 ГБіт/с	600 МГц	Категорія 7	4
2006	IEEE 802.3an	10GBASE-T	100	10 ГБіт/с	1000 МГц	Категорія 7a	4
2015	IEEE 802.3 bw	100BASE-T1	15 м UTP	100 МБіт/с	66 МГц	SPE	1
2016	IEEE 802.3 bp	1000BASE-T1	40 15 м UTP	1000 МБіт/с	600 МГц	SPE	1
2019	IEEE 802.3 cg	10BASE-T1L 10BASE-T1S	1000 25 м UTP	10 МБіт/с	20 МГц	SPE	1
2020	IEEE 802.3 ch	Multi-Gig	(15 м)	(2,5/5/10 ГБіт/с)	-	SPE	1

УДК 621.311

## РЕГУЛЮВАННЯ НЕБАЛАНСІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ЗА РАХУНОК ГІБРИДИЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Савченко Н.А.<sup>1</sup>, Шевченко С.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донбаська національна академія будівництва та архітектури, Україна,  
м. Краматорськ

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків

З впровадженням оптового ринку електричної енергії в Україні для промислових підприємств дедалі актуальнішим стає завдання оптимізації витрат на купівлю електроенергії, що становить значну частку у собівартості продукції [1].

Одним із нововведень енергетичного ринку став початок так званих балансуючого ринку та ринку небалансів, покликаних стабілізувати ситуацію та дисциплінувати постачальників та споживачів у питаннях прогнозування енерговитрат на виробничі потреби. Відтепер у разі надмірного витрачання ресурсів та у разі виникнення їх надлишку промисловий споживач нестиме фінансові втрати. При цьому у разі позитивного небалансу промисловий споживач розраховується за електричну енергію, яку не спожив у розмірі 85% від її вартості, а у разі негативного небалансу – вартість надлишку спожитої електроенергії становить 115%. Таким чином, прогнозування та регулювання небалансів є позачерговою задачею на промислових підприємствах, вирішення якої значно зменшує фінансові втрати.

Для регулювання енергоспоживання на промисловому підприємстві необхідно, по-перше здійснити контроль технічного стану систем обліку електроенергії з необхідністю одночасного вирішення питань оцінки технологічних витрат електричної енергії та питань сучасної автоматизації процесу обліку, по-друге визначитися з характером небалансу між замовленим лімітом і споживанням електричної енергії та розробкою організаційно-технічних заходів щодо зниження витрат.

Процес прогнозування споживання електричної енергії є складним, багатofакторним та завжди має невизначений відсоток похибки. Звісно витрати на небаланси будуть зменшені, але більш дієвим способом регулювання небалансів споживання електричної енергії є керування ними у реальному часі при гібридизації системи електропостачання.

Гібридна система електропостачання у даному випадку складається з традиційного джерела електричної енергії, а саме електричної мережі, та альтернативних джерел енергії – фото-вітроелектростанцій з системою зберігання електроенергії з різними типами накопичення енергії. Схемна конфігурація гібридної системи електропостачання промислового споживача, що передбачає можливість реалізації роздільної та спільної роботи ФЕС і електромережі (рис. 1) [2].

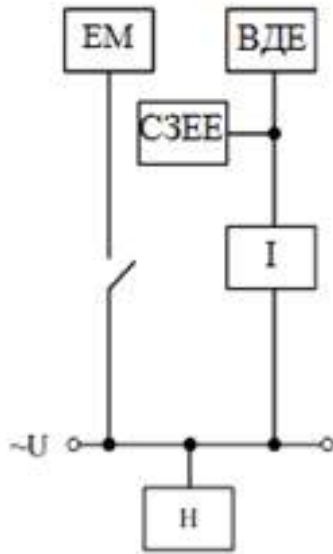


Рисунок 1 – Схемна конфігурація гібридної системи електропостачання:  
ВДЕ – відновлювальні джерела енергії, ЕМ – електромережа, СЗЕЕ – система зберігання електричної енергії, Н – навантаження, U – шина змінного струму, І – інвертор

Алгоритм ефективного управління робочими режимами гібридної системи електропостачання наведеної на рис.1 дозволяє ефективно регулювати негативні небаланси, які є найбільш затратними.

За статистичними даними негативних небалансів визначається максимальна потужність ВДЕ генерації електроенергії для потреб промислового споживача. Регулювання споживанням електричної енергії виконується вздовж доби з урахуванням розрахунку середньодобової потужності споживання та результатів прогнозування споживання електричної енергії.

Метою роботи є удосконалення алгоритму управління робочими режимами гібридної системи електропостачання, що призведе до зменшення фінансових витрат промислового споживача за рахунок управління небалансами.

#### Список використаних джерел:

1. Закон України «Про ринок електричної енергії». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19/print1478693057256668#Text>.
2. Лукутин Б.В. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2019. – 115 с.

УДК 621.315.1

ДИНАМІКА ВИПУСКУ КАБЕЛІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ  
В СВІТІ ТА УКРАЇНІ

Сокол-Прусський В.Я.

*Кам'янець-Подільський кабельний завод, Україна, м. Кам'янець-Подільський*

Збільшення попиту на електроенергію стимулюють зростання ринку проводів та кабелів енергетичного призначення. Світовий ринок проводів та кабелів оцінювався у 156,11 млрд доларів у 2020 році, а до 2030 року досягне 267,17 мільярдів доларів США [1]. Якщо прийняти обсяг світового кабельного ринку за 100%, то 66% ринку складають кабелі енергетичного призначення; 20% – кабелі телекомунікаційного призначення, включаючи волоконно-оптичні кабелі, і 14% – обмотувальні проводи. До 2022 року прогнозується зростання обсягів випуску силових кабелів низької напруги в 1,25 рази (рис. 1).

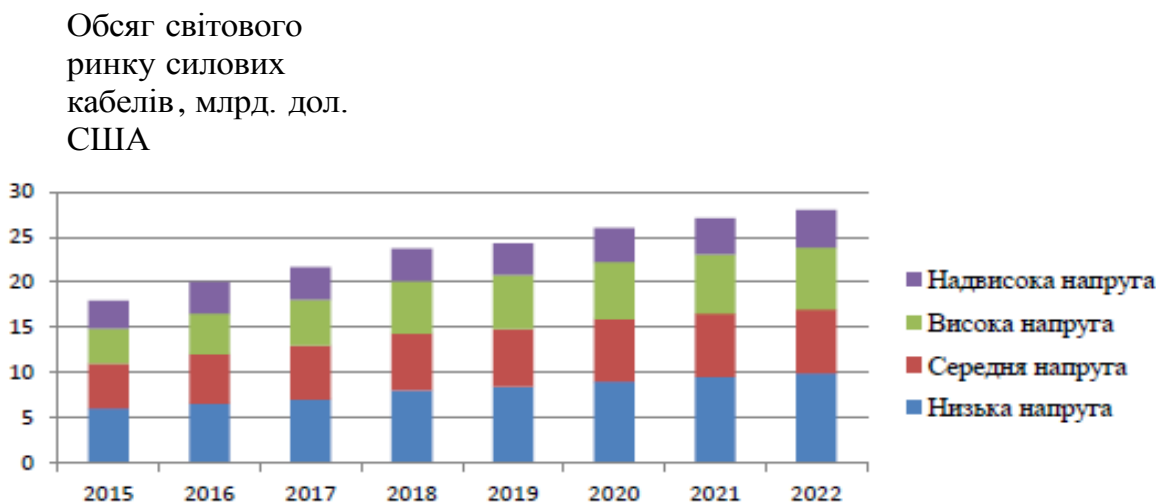


Рисунок 1 – Динаміка змінення випуску силових кабелів у світі [1]

На світовому ринку сегмент силових кабелів низької напруги становив найбільшу частку доходу у 2020 році: приблизно 43% завдяки високому використанню низьковольтних кабелів у розподільчих мережах, будівлях, локальних мережах, тощо. Адже низьковольтні проводи та кабелі забезпечують постачання електроенергії інтенсивно зростаючим «розумним мережам» та абонентам кінцевого споживання. В Україні також спостерігається зростаюча динаміка випуску на 128,4% силових кабелів та проводів на низьку напругу. При цьому найбільшими темпами – на 140,3% – зросли продажі силових кабелів на напругу понад 1 кВ.

Однією з основних перспектив розвитку кабельної промисловості є впровадження інновацій, оскільки при розробці продукції виробники нерідко базу-

ються на традиційних технологіях, котрі не завжди задовольняють сучасним вимогам. Головною інновацією в кабельній галузі сьогодні є гібридні кабелі, в конструкції яких об'єднані електричний силовий кабель і кабель зв'язку. Такий гібридний кабель необхідний для створення об'єднаних в одну систему мереж енергопостачання і зв'язку, що, безумовно, є сучасним «трендом».

**Список використаних джерел:**

1. Wires And Cables Market Size, Share & Trend Analysis Report By Voltage (Low, Medium, High, Extra High), By Installation (Overhead, Underground), By End-use, By Region, And Segment Forecasts, 2021. – 2028 p.

УДК 621.311

**СТРАТЕГІЯ КЕРУВАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ  
ГЕНЕРАЦІЄЮ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ****Тугай Ю.І., Тютюнник Ф.О., Нікішин Д.А.***Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Україна, м. Київ*

В сучасних дослідженнях, що виконуються в напрямку інтеграції розосередженої генерації (РГ) до електричних мереж, вагомим місцем займає вдосконалення систем керування джерелами генерації. В даному напрямку можна виділити два рівні – апаратний та логічний (або алгоритмічний).

Відповідно актуальною задачею стає розвиток стратегій керування РГ, які являють собою логічну основу систем керування. Виходячи з проведеного аналізу наявних результатів досліджень, можна зробити висновок про необхідність акцентувати увагу на побудові стратегії керування на основі граничного за стійкістю режиму. Для цього було сформоване узагальнене представлення стратегії керування. Специфікою такого підходу є можливість оперування різними параметрами для досягнення граничного режиму, і як наслідок – використання різних аналітичних залежностей для оцінювання такого режиму та корегування в рамках стратегії керування.

В рамках розробки класифікації РГ виконано аналіз різнорідних джерел. Головними складовими контексту класифікації стало зосередження уваги на фізичній природі, можливостях по керуванню та накопиченню енергії. Оскільки динамічні властивості джерел генерації відіграють важливу роль в питаннях пов'язаних із стійкістю, запропоновано підхід до імітації інерції безінерційних джерел, що базується на відтворенні динамічних властивостей турбогенераторів. Запропонований підхід відрізняється застосуванням неперервних залежностей, на противагу звичайним дискретним підходам.

Показано, що вагомим ефектом від впровадження джерел РГ є зменшення перетоків потужності на різних рівнях ієрархії електричних мереж, як наслідок підвищення статичної стійкості, виражене у збільшенні коефіцієнту запасу за активною потужністю.

**Список використаних джерел:**

1. Тугай Ю.І., Козирський В.В., Приступа А.Л., Тютюнник Ф.О. Дослідження впливу розосередженої генерації в розподільчих мережах на стійкість режимів локальних сегментів електричних систем / Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. – Вип. 187. – 2017. – С. 3–5.
2. Козирський В.В., Тугай І.Ю., Тютюнник Ф.О. Про використання тензорного аналізу в задачах визначення запасу статичної стійкості електричних систем за наявності джерел розподіленої генерації / Праці Інституту електродинаміки НАН України. – Вип. 50. – 2018. – С. 23–27.

УДК 621.311

**АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ УКРАЇНСЬКИХ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ****Черкашина В.В., Баклицький В.М.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

На даний момент Українські електричні мережі знаходяться в деякій мірі в розбалансованому, перехідному стані. Перехід від енергоємних шляхів отримання електричної енергії до більш екологічних та економічно ефективних приводить до здорожчання електричної енергії на внутрішньому ринку через зміну вироблюваної потужності в секторі атомної та теплової енергетики в період карантинної кризи та на фоні гарантованої закупівлі «зеленої» електричної енергії, що створює привабливі умови щодо імпорту електричної енергії [1, 2]. Але це не суперечить правилам ринку з однієї сторони, створюючи більше різноманіття щодо цінової політики, проте не в повній мірі відповідає шляху розвитку наміченого українським керівництвом у сфері електроенергетики. Тому, що Українська електроенергетика розвивається згідно настанов Європейського Союзу (ЄС) для можливості забезпечення співробітництва та інтеграції ринку електричної енергії на європейському та загальнодержавному рівнях. Для досягнення засад, які регламентуються Європейською енергетичною політикою та викладенні в нинішній нормативній базі необхідно покращення інформативності передачі електричної енергії [1, 3].

Спираючись на огляд технологій, які запроваджуються ЄС в сфері електроенергетики можна сказати що використання системи WAMS в комплексі з модернізацією існуючої системи SCADA може сформувати вдосконалений інструмент підтримки прийняття рішень щодо надійності мережі та максималізації її пропускну здатності за умов зменшення втрат електричної енергії. Застосування даної системи покращить уявлення про динамічні процеси в електричній мережі для детального аналізу застосування технологій Smart Grid [3].

Слід відмітити, що напрямок розвитку технологій Smart Grid орієнтується й на керування попитом та прогнозування покращення стимулювання активної участі споживача шляхом тарифоутворень. Це стосується не тільки промисловості, а й побутових споживачів. Відміна субсидіювання, стимул до зміни енергоспоживання, застосування заходів щодо енергоефективності в залежності від зміни ціни на електроенергію є одними з основних способів регулювання стану електричної мережі «активним» споживачем. Для впровадження такого регулювання необхідне своєчасне «сигналювання» споживачів та високий рівень оперативності при прийнятті рішень щодо тарифоутворень, які будуть базуватися на аналізованні поточного стану електричної мережі. Одним із основного обладнання, яке перетворює звичайного споживача в активного є АСКОЕ. Використання цієї сис-

теми являється основним способом отримання економічного ефекту для споживача та автоматичним коригуванням системи електропостачання [4].

Покращення наявного рівня інформатизації та виведення її на новий рівень повинен проводитися одночасно з переглядом концепції формування електричної мережі щодо силового обладнання, яке пов'язане з економічним занепадом більшості виробничих структур. Зменшення потреби в навантаженні серед промислових підприємств та збільшення обсягів споживання електроенергії в суспільному секторі викликали зміну розподілу навантаженості силових трансформаторів на підстанціях. В зв'язку з недостатністю фінансування, керівництво на рівні обласних електричних мереж задовольняються існуючим парком трансформаторів, проводять заміни трансформаторів на окремих підстанціях, спираючись на доцільність застосування в залежності від рівня втрат короткого замикання та холостого ходу. Більшість трансформаторів відпрацювали свій ресурс та не відповідають заявленим характеристикам заводів виробників щодо нормованого рівня втрат. Це говорить про необхідність перегляду номенклатури потужностей силових трансформаторів, яка буде відповідати Українським реаліям.

З огляду на вищенаведене, можна зробити висновок, що Українська електроенергетика рухається в напрямку впровадження технологій Smart Grid на шляху до створення інформативних мереж, запроваджених іншими країнами, але для подальшого розвитку потребує формування чіткої концепції та стратегії, яка б якомога більше відповідала Українським реаліям, в тому числі й щодо силового обладнання електричних мереж.

#### **Список використаних джерел:**

1. Оцінка стану та реалізації концепцій розвитку «інтелектуальних» електромереж у світовій практиці [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/3.-SmartGrid.pdf>.
2. Біла книга. Розподілені енергетичні ресурси та технології. Створення передумов для їх оптимального використання в Україні. Автори дослідження: А. Зінченко, І. Бондарчук, В. Хоменко. Програма розвитку ООН в Україні, Кловський узвіз, 1, Київ, 01021, Україна, 2020. – 24 с.
3. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін. електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
4. Добровольська Л.Н., Лесько В.О., Черкашина В.В. Автоматизація розподільних електричних мереж в умовах балансуючого ринку електроенергії: навч. посіб. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2014. – 208 с.

УДК 621.315.1

**ВПЛИВ ІНДУКОВАНИХ БЛИСКАВКОЮ ПЕРЕНАПРУГ  
НА БЛИСКАВКОЗАХИСТ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ  
З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРОВОДІВ****Шевченко С.Ю., Дривецький С.І.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Підвіска грозозахисних тросів, що є основним грозозахисним заходом на лініях класів напруги 110 кВ і вище, мало ефективна для ліній 6-35 кВ, що викликано низькою імпульсною міцністю ізоляції. Внаслідок цього ймовірність зворотних перекриттів при ударах блискавки в опору або в трос виявилися б, при звичайних значеннях опору заземлення опор, досить значною. Тому лінії 6-35 кВ споруджуються, як правило, без тросів. Винятки становлять лише особливо відповідальні лінії 35 кВ на металевих опорах [1].

Незважаючи на відсутність тросів, лінії 6-35 кВ мають ряд особливостей, що створюють більш сприятливі умови для їх блискавко захисту. По-перше, ці лінії рідше піддаються прямим ударам блискавки через їх відносно невеликі висоти і протяжності. Нерідко вони виявляються частково захищеними від прямих ударів блискавки розташованими поблизу лінії об'єктами: будівлями, високими деревами, лініями більш високої напруги і т.п. [2].

По-друге, наявність ізольованої або заземленої через дугогасний реактор нейтралі в мережах 6-35 кВ полегшує боротьбу з наслідками імпульсних перекриттів ізоляції, сприяє гасінню дуги однофазного замикання на землю. Можна вважати, що випадки грозових перекриттів ізоляції тільки однієї з фаз лінії не викликають її відключення. Дуга, що виникла при однофазному перекритті гасне, і небезпеку для ліній 6-35 кВ представляють лише перекриття між фазами або одночасні перекриття декількох фаз на землю. При міжфазних перекриттях залишається високою ймовірність згасання дуги, тому що градієнт робочої напруги вздовж шляху перекриття на цих лініях невеликий.

По-третє, лінії 6-35 кВ часто споруджуються на дерев'яних опорах. У цьому випадку довжина шляху грозового перекриття ізоляції збільшується за рахунок імпульсної міцності дерева, траверси і стійки опори [3]. Зменшується ймовірність перекриття і ймовірність переходу імпульсного перекриття в дугу короткого замикання. Однак ці переваги дерев'яних опор не вдається реалізувати в повній мірі через можливість розщеплення дерев'яних частин при прямих ударах блискавки. Для боротьби з розщепленням траверс і стійок опор в ряді випадків доводиться шунтувати дерев'яні частини опор струмовідводними металевими спусками.

На відміну від ліній більш високого класу напруги, лінії 6-35 кВ на металевих опорах частіше відключаються внаслідок впливу індукованих перенап-

руг, здатних викликати перекрыття ізоляції 35 кВ, які в п'ять разів більше, ніж число перенапруг, небезпечних для мережі 110 кВ. Причиною цього також є невисока імпульсна міцність ізоляції ліній 6-35 кВ на металевих опорах [4].

Захист ПЛ від індукованих перенапруг може бути забезпечений шляхом встановлення по одному довго-іскровому розряднику на кожному опорі лінії [5].

Індуковані перенапруги на проводах всіх трьох фаз приблизно однакові і впливають відразу на велику ділянку ПЛ, що включає в себе кілька опор. У момент часу  $t_p$  відбувається спрацьовування розрядників на опорах. Для конкретності розглянемо процеси, що відбуваються на опорі №1 (на опорах №2 і 3 ситуація аналогічна). Під дією індукованої перенапруги  $U_{ind}$  з обох сторін по дроту фази А протікають струми  $i$ , які далі підсумовуючись протікають по каналу іскрового перекрыття розрядника і через опір заземлення опори [6].

Величини наведених перенапруг на сусідніх фазах найчастіше не вистачає для пробою гірлянди ізоляторів. Для класу напруги 35 кВ пробивна напруга дорівнює 425 кВ, для класу напруги 6 кВ це 130 кВ відповідно. Розрахунки по яким будувалися графіки проводилися для різних значень опору заземлення опори, ці розрахунки показали, що при збільшенні значення опору заземлення різниця потенціалів на ізоляції зменшується.

### Список використаних джерел:

1. Разевиг Д.В. Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи. / Д.В. Разевиг. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 216 с.
2. Rakov V. A. Lightning. Physics and Effects. / V. A. Rakov, M. A. Uman. – Cambridge: University Press, 2003. – 183 p.
3. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. Учебник для вузов / В. В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь и др.; под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
4. Шилин А.Н. Расчёт надёжности воздушных линий электропередачи с учётом влияния погодных условий [Текст] / А.Н. Шилин, О.И. Доронина // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 4. – с. 18–22.
5. Калакутский Е. Молниезащита ВЛ 6-220 кВ мультикамерными разрядниками и изоляторами-разрядниками [Текст] / Е. Калакутский // Четвертая Российская научно-практическая конференция с международным участием: Линии электропередачи - 2010: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс. – Новосибирск, 2010. – С. 153 – 158.
6. ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 Менеджмент ризику. Захист від блискавки. Частина 1. Загальні принципи. Ідентичний МЭК 62305-1:2010.

УДК 621.315.1

**ВПЛИВ ВТРАТ НА КОРОНУ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ  
ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ****Шевченко С.Ю., Олубакінде Е.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Проблема економічності роботи мереж 220 кВ і вище за її малої завантаженості нині пов'язана як і й не так із втратами у проводах від струмів навантаження, як із втратами на корону. Середньорічні втрати потужності та енергії на корону повітряних ліній (ПЛ) 330 і 500 кВ становлять 12 %, а ПЛ 750 кВ – 14 % від сумарних втрат (на корону та від струму навантаження), при цьому втрати у проводах розраховуються для натуральної потужності  $P_{\text{нат}}$ . Так як насправді середні навантаження ПЛ рази в 2 менші за  $P_{\text{нат}}$ , то втрати на корону ПЛ 330 і 500 кВ складуть 35%, а ПЛ 750 кВ – 39 % від сумарних втрат. Втрати потужності на корону в залежності від виду погоди змінюються на 1-2 порядки, тому найефективніше знижувати їх максимальні значення, які мають місце при морозі, дощі, снігу. У цих умовах зниження втрат потужності та енергії в мережі визначатиметься, головним чином, зменшенням втрат на корону. Питомі втрати на корону за різних кліматичних умов отримані експериментальними методами та наведені у відповідних таблицях довідників та керівних вказівок з обліку втрат на корону.

Як показано вище частка втрат на корону у величині загальних втрат, досить велика. Зниження таких втрат на 10 % дає зниження загальних втрат в середньому на 1 %. На нашу думку, перспективними є прості та економічно виправдані рішення щодо зменшення втрат на корону. Зниженню втрат на корону присвячено багато робіт. Як правило, всі подібні роботи передбачають регулювання напруги на лініях електропередавання (ЛЕП) і отримання ефекту за рахунок зниження напруженості поля на проводах. У нашому випадку розглядається конструктивні особливості спорудження ЛЕП.

Всі розрахунки напруженості поля на проводах ЛЕП проводяться виходячи з припущення, що провід розташований на певній фіксованій висоті від землі. При такому розташуванні дроту розраховується його ємність, а потім напруженість поля на його поверхні. Однак у реальному житті це не так. Провід не розташований паралельно землі. Він має кілька характерних точок підвісу, до яких можна віднести точку кріплення дроту до гірлянди та точку найбільшого провису, що знаходиться на висоті відповідної габариту лінії до землі. При великих стрілах провису проводів ці відстані істотно відрізняються.

Проведені нами та іншими авторами розрахунки наприклад [1, 2] показали, що розподіл напруженості по довжині прольоту величина змінна і має максимальні значення в характерних точках проводу. Цей факт дозволяє зробити висновок про те, що знизити втрати можна зменшивши напруженість у цих точках.

**Список використаних джерел:**

1. Potkrajac D., Papenheim S., Kizilcay M. 3D-model of an AC/DC Hybrid EHV Transmission Line to Analyze the Electrical Potential along Insulators. – University of Siegen, Siegen, Germany.
2. Белогловский А.А. Расчёт электрических и магнитных полей воздушных линий электропередачи. – НИУ «МЭИ», кафедра ТЭВН, 2019. – 87 с.

УДК 621.315.1

**ВТРАТИ НА КОРОНУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ****Шевченко С.Ю., Олубакінде Е.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Серед актуальних тенденцій у світі спостерігається прагнення до підвищення ефективності виробництва, передачі та споживання електроенергії. Одним із пріоритетних завдань оптимізації електроенергетичних мереж є оптимізація експлуатації ліній електропередавання (ЛЕП), оскільки їхня частка у загальній кількості втрат електроенергії в Україні становить найбільшу частину із загальної кількості втрат електроенергії. Втрати у ЛЕП можна поділити на втрати на нагрівання та втрати на корону. Втрати на нагрівання пов'язані з конструкцією повітряних ліній (ПЛ) та її навантаженням (струмом). Для конкретної лінії перетин проводу визначає її омичний опір і відповідно втрати на нагрівання. У разі втрат на корону ситуація дещо інша. Цей вид втрат залежить від напруги на ЛЕП та радіусу дроту, який використаний. Здавалося б, втрати на корону повинні бути незмінними при номінальній напрузі. Однак, цей вид втрат залежить не тільки від напруги ЛЕП, а й від її конструктивного виконання.

На відміну від втрат навантаження втрати на корону мають іншу природу і визначаються особливостями роботи повітряної ізоляції ліній електропередач. Особливий характер мають і заходи, створені задля зниження втрат на корону, основу яких становлять різні методи регулювання робочої напруги мережі [1]. Очевидно в умовах ринку та компенсація витрат на втрати енергії за рахунок корони має формуватися за іншими правилами, ніж для втрат навантаження. Законом «Про електроенергетику» визначено, що мережеві компанії оплачують втрати електроенергії у своїх мережах за винятком тих втрат, які залежать від навантаження та включені до вузлових цін на електроенергію. Комерційні та умовно-постійні технологічні втрати, у тому числі й втрати на корону, сплачують споживачі. Джерелом коштів для оплати цієї складової втрат є мережевий тариф.

Норматив на втрати встановлюється службами за тарифами і всі відхилення від нього включаються до прибутку або в збитки, що і повинно визначати зацікавленість мережевих компаній у зниженні втрат. Сьогодні розроблено різні методи оцінки та зниження навантажувальних втрат в електричних

мережах надвисокої напруги [2]. На відміну від складової навантаження втрат електроенергії втрати на корону вимагають подальших досліджень і вдосконалення методики обліку. Основні погодні фактори, що вирішально впливають на величину втрат електроенергії, не мають чітких меж при ідентифікації, що знижує достовірність розрахункових методів.

**Список використаних джерел:**

1. Постанова Кабінету Міністрів України № 152 від 27 лютого 2019 р. «Про затвердження технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для малих, середніх та великих силових трансформаторів».
2. Белицын И.В. Методы и способы уменьшения несимметрии напряжения воздушной линии электропередачи / И.В. Белицын // Международная научнопрактическая конференция «Прикладные и теоретические исследования». – Самара. ЦНИК «Наука и просвещение», 2017. – С. 27–30.

УДК 621.314.212:543.544.3

**АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ ЗМІНИ НОМОГРАМ ДЕФЕКТІВ****Шутенко О.В.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Несвоєчасне виявлення або пропуск дефекту в силових трансформаторах може привести до їх аварійного пошкодження, що в свою чергу супроводжується значним економічним збитком. В таких умовах принципово важливим є можливість своєчасного виявлення і розпізнавання розвиваючих дефектів. Однак норми і критерії, що регламентуються як міжнародними, так і національними стандартами з інтерпретації результатів аналізу розчинених в маслі газів (АРГ), як одного з найбільш поширених методів виявлення розвиваються дефектів в маслонаповненому обладнанні, дозволяють діагностувати дефекти тільки в разі перевищення концентраціями газів граничних значень. Очевидно, що в ситуації, що склалася виникає об'єктивна необхідність в розробці підходів, що дозволяють виявляти дефекти силових трансформаторів на ранній стадії. Одним з можливих шляхів вирішення даного завдання є аналіз динаміки зміни критеріїв використовуваних для інтерпретації результатів АРГ в часі. Ефективність такого підходу підтверджують результати досліджень наведені в [1-3]. Однак в даних роботах основний акцент досліджень був спрямований на аналіз динаміки зміни в часі значень концентрацій газів і значень відносин газів. У той же час аналізу динаміки зміни номограм, в процесі розвитку дефектів, практично не розглядався, за винятком [4].

Виконані дослідження динаміки зміни номограм дефектів по 141 трансформатору з дефектами різного типу дозволили встановити, що номограми дефектів, побудовані за результатами АРГ трансформаторів, відповідають тому чи іншому типу дефекту ще до того моменту коли концентрації газів перевищать граничні значення, що може бути використано для раннього виявлення дефекту. Нижче наведено кілька прикладів розвитку дефектів в силових трансформаторах.

Трансформатор типу ТРДН, номінальною потужністю 25 МВА і напругою 110 кВ, був пошкоджений дуговим розрядом 25.06.2008 р. Варто зазначити, що в двох пробах взятих за чотири і два місяці перед пошкодженням трансформатора, значення концентрацій газів не перевищували граничні значення. При цьому в пробах масла взятих 25.02.08 (за чотири місяці до пошкодження трансформатора) значення всіх концентрацій газів відповідали рівню І, що характерно для нормально працюючих, справних трансформаторів. А ось в пробах масла отриманих через два місяці після попереднього відбору (25.04.08) концент-

рація метану збільшилася до рівня II, що при значеннях швидкостей наростання газів перевищують 30 мкл/добу може свідчити про наявність дефекту. Однак швидкість наростання метану в даному трансформаторі не перевищила 10 мкл/добу, внаслідок чого було прийнято рішення про відсутність дефекту. На рис. 1 наведено динаміку зміни номограм, побудованих за результатами АРГ даного трансформатора. Як видно з рисунку, номограми побудовані за результатами АРГ, отриманих за чотири і за два місяці до пошкодження відповідають перегрівам в діапазоні середніх температур [5]. Скоріш за все дуговий розряд, який призвів до пошкодження трансформатора, з'явився наслідком розвитку локального перегріву, про що свідчить номограма побудована за результатами АРГ від 25.04.08.

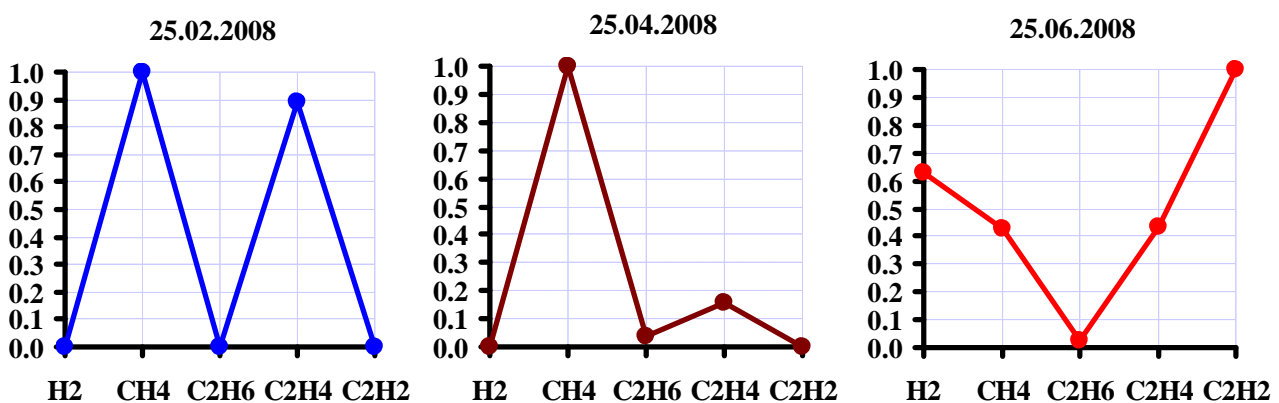


Рисунок 1 – Динаміка зміни номограм дефектів в трансформаторі ТРДН - 25 110 кВ

На рис. 2, наведені номограми, побудовані за результатами АРГ трансформатора 250 кВ гідроелектростанції "Nelson river", Північна Канада, [3] за 10 місяців до пробою (рис. 2а) і після пошкодження (рис. 2б). Даний трансформатор був виготовлений в 1977 р, пошкоджений в лютому 1994 р Трансформатор відключився через 16 хвилин після пошкодження, коли спрацювало газове реле. В результаті розбору трансформатора, на сполучному кінці на ляльці виявлені сліди мідних частинок, які викликали тепловий пробій. Огляд обмотки після пробою показав наявність частинок в обмотці і на магнітопроводі. Слід зазначити, що значення концентрацій газів, за якими побудована номограма на рис. 2а, відповідали справному стану а отже, формальних приводів для прийняття рішення про наявність дефекту у персоналу станції не було. А ось значення концентрацій всіх п'яти газів, за якими побудована номограма на рис. 2б, перевищували граничні значення. При цьому згідно [5] номограми, аналогічні наведеним на рис. 2, характерні для термічних дефектів в діапазоні температур 150-300 °С і низькотемпературним перегрівів, які супроводжуються розрядами.

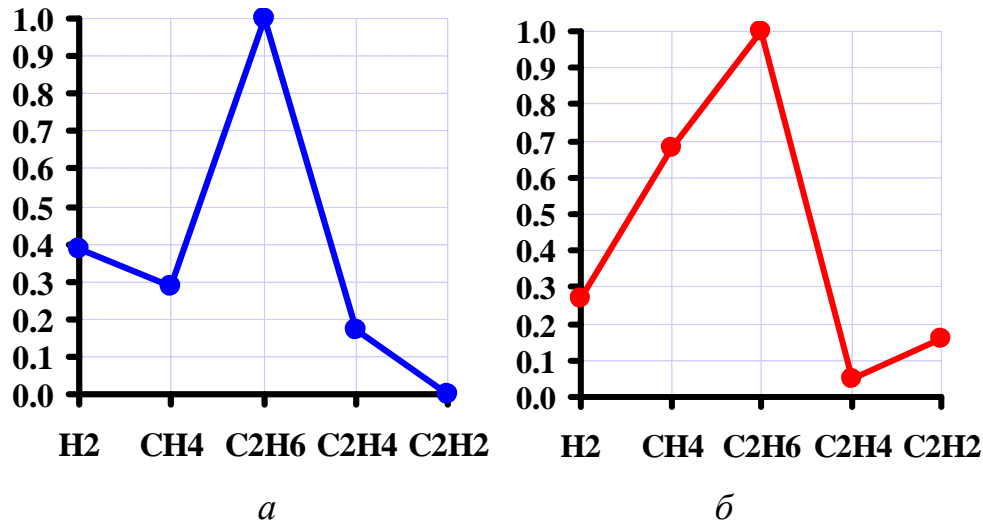


Рисунок 2 – Номограми, побудовані за результатами АРГ трансформатора 250 кВ гідроелектростанції "Nelson river", Північна Канада за 10 місяців до пробою (а), і після пробою (б)

На рис. 3 наведено номограми, побудовані за результатами АРГ трансформатора 1250 кВ гідроелектростанції "Nelson river", Північна Канада [3], за 5 днів до пробою (рис. 3а) і після пошкодження (рис. 3б).

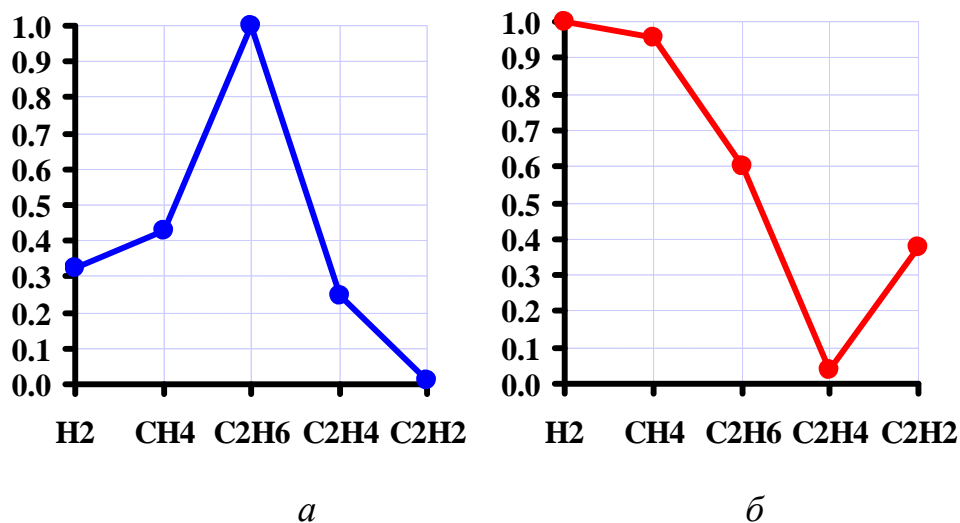


Рисунок 3 – Номограми, побудовані за результатами АРГ трансформатора 125 кВ гідроелектростанції "Nelson river", Північна Канада за 5 днів до пробою (а), і після пробою (б)

Даний трансформатор був виготовлений в 1977 р, працював із завантаженням 75% від номінальної потужності, пошкоджений в серпні 1998 р. Трансформатор був обладнаний найсучаснішим аналізатором розчинених в маслі газів типу «Atom» і крім того, аналізатором водню і суми горючих газів з бака типу Hydран 201Т. однак обидві системи не запобігли пробою. Також як і в попередньому випадку значення концентрацій газів, за якими побудована номо-

грама на рис. 3а, відповідали справному стану. Значення концентрацій, отримані після пошкодження, вже перевищували граничні значення. Причиною пробою було пошкодження ізоляції між котушками і витковою ізоляцією. Як видно з рисунка номограми, побудовані за результатами АРГ, отримані до і після пробою ізоляції трансформатора істотно відрізняються і при цьому згідно [5] номограма наведена на рис. 3а відповідає перегрівів в діапазоні температур 150-300 °С, а на рис. 3б – низькотемпературних перегрівів, які супроводжуються розрядами.

Наведені приклади наочно ілюструють, що прояв дефектів має місце ще до того моменту коли значення концентрацій газів перевищать свої граничні значення, що дає можливість для раннього виявлення розвиваються пошкоджень. Більш того, у всіх трьох наведених прикладах спостерігається зміна типу дефекту в процесі його розвитку. З номограм дефектів чітко видно, що процеси починалися з температурних перегрівів, причому в двох останніх випадках температура гарячої точки не перевищувала 300 °С, а в процесі розвитку перетворилися в розряди або перегриви, які супроводжуються розрядами. При цьому у всіх випадках Трансформатори були пошкоджені. Отже, при оцінці можливості подальшої експлуатації трансформаторів крім ступеня небезпеки дефекту і швидкості його розвитку необхідно враховувати можливість перетворення дефекту з менш «небезпечного» в більш «небезпечний» і швидко розвивається.

### Список використаних джерел:

1. Шутенко О.В. Анализ причин газовой выделения в силовых трансформаторах, на основе исследования корреляционных связей между растворенными в масле газами / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай, Т.А. Острикова, Н.Ю. Мельник // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: «ХНАМГ». – 2012. – №3. – С. 72–81.
2. Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. Acta Electrotechnica et Informatica. – 2018. – Vol. 18. – №. 1. – P. 11–18. DOI: 10.15546/aei-2018-0002.
3. Шутенко О. В. Особенности динамики изменения критериев используемых для интерпретации результатов ХАРГ в силовых трансформаторах с разными типами дефектов / О. В. Шутенко // Новое в Российской электроэнергетике. – Москва. – 2017. – № 9. – С. 30–49.
4. Shutenko O. Analysis of gas composition in oil-filled faulty equipment with acetylene as the key gas / O. Shutenko // Energetika. – 2019. – Vol. 65, No. 1. – PP. 21-38. DOI: 10.6001/energetika.v65i1.3973.
5. Шутенко О.В. Анализ графических образов, построенных по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов с различными типами дефектов / О.В. Шутенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – №31 (1253). – С. 97–121.

УДК 621.315.626

## ДІАГНОСТИКА СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ МАСЛОПОВНЕНИХ ВВОДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОШЕНЬ ПРАВДОПОДІБНОСТІ

Шутенко О.В., Загайнова О.А.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Високовольтні маслонаповнені вводи є одним з найбільш пошкоджуваних вузлів силових трансформаторів, шунтуючих реакторів і вимикачів. У зв'язку з цим удосконалення методів діагностики їх стану є актуальним і практично важливим завданням.

У даній роботі для ранньої діагностики стану ізоляції високовольтних вводів запропоновано використовувати метод відношень правдоподібності. Мета методу [1] полягає в тому, що рішення про стан діагностуючого об'єкта приймається не на основі порівняння вимірюваного значення показника ізоляції з гранично допустимим значенням, а на основі аналізу відношень щільності ймовірностей розподілу, параметра  $x$ , для справного і дефектного станів. Наведені в роботі [2] результати досліджень свідчать, що показники ізоляції високовольтних вводів, як для справних, так і для дефектних вводів можуть бути описані розподілом Вейбула. При цьому значення параметрів розподілу Вейбула для показників у справних високовольтних вводах істотно відрізняються залежно від цілого ряду факторів [3]. З урахуванням розподілу Вейбула вирішальне правило при використанні відношень правдоподібності, для оцінки стану вводів за значенням  $\text{tg}\delta$  ізоляції, може бути записано у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} x \in D_1, \text{ якщо } \frac{\frac{\beta_1}{\alpha_1^{\beta_1}} \cdot \text{tg}\delta^{\beta_1-1} \cdot e^{-\left(\frac{\text{tg}\delta}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}}}{\frac{\beta_2}{\alpha_2^{\beta_2}} \cdot \text{tg}\delta^{\beta_2-1} \cdot e^{-\left(\frac{\text{tg}\delta}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}}} > \frac{C_{12}P_2}{C_{21}P_1}, \\ x \in D_2, \text{ якщо } \frac{\frac{\beta_1}{\alpha_1^{\beta_1}} \cdot \text{tg}\delta^{\beta_1-1} \cdot e^{-\left(\frac{\text{tg}\delta}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}}}{\frac{\beta_2}{\alpha_2^{\beta_2}} \cdot \text{tg}\delta^{\beta_2-1} \cdot e^{-\left(\frac{\text{tg}\delta}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}}} < \frac{C_{12}P_2}{C_{21}P_1}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $P_1$  – апіорна ймовірність діагнозу  $D_1$ ;  $P_2$  – апіорна ймовірність діагнозу  $D_2$ ;  $C_{21}$  – умовна вартість хибної тривоги;  $C_{12}$  – умовна вартість пропуску дефекту;  $\alpha_1, \beta_1$  – значення параметрів масштабу і форми для розподілу значень

$\operatorname{tg}\delta$  в справних вводах;  $\alpha_2, \beta_2$  – значення параметрів масштабу і форми для розподілу значень  $\operatorname{tg}\delta$  в дефектних вводах.

Вираз (2) можна істотно спростити якщо ввести величину:

$$D = \frac{\frac{\beta_1}{\alpha_1^{\beta_1}} \cdot \operatorname{tg}\delta^{\beta_1-1} \cdot e^{-\left(\frac{\operatorname{tg}\delta}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}}}{\frac{\beta_2}{\alpha_2^{\beta_2}} \cdot \operatorname{tg}\delta^{\beta_2-1} \cdot e^{-\left(\frac{\operatorname{tg}\delta}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}}} - \frac{C_{12}P_2}{C_{21}P_1}. \quad (2)$$

Тоді правило (1) можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} x \in D_1, & \text{если } D > 0, \\ x \in D_2, & \text{если } D < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Розглянемо приклад діагностики стану дефектного вводу ГМТА-110/630-У1 110 кВ, встановленого на фазі А, трансформатора ТРДН-25/110. Даний ввід був відбракований за значеннями  $\operatorname{tg}\delta_2$  і 07.07.2017 року був виведений з експлуатації. Залежності  $\operatorname{tg}\delta$  основної ізоляції аналізованого вводу ( $\operatorname{tg}\delta_1$ ) і ізоляції вимірювального виводу ( $\operatorname{tg}\delta_2$ ) від тривалості експлуатації наведені на рис. 1. Пунктирною лінією на рисунку позначено гранично допустиме значення даного показника.

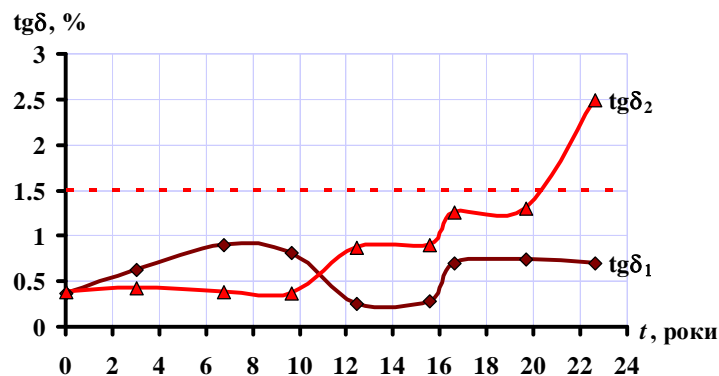


Рисунок 1 – Залежності тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції і тангенса кута діелектричних втрат ізоляції вимірювального виводу від тривалості експлуатації для дефектного вводу ГМТА-110/630-У1

З огляду на досить високе напрацювання вводу значення ймовірності справного стану було прийнято на рівні  $P_1=0,95$ , відповідно  $P_2=1-P_1=0,05$ . За аналогією з [4, 5] прийемо  $C_{12}=100$ , а  $C_{21}=1$ . Послідовно підставляючи отримані в результаті експлуатаційного контролю значення  $\operatorname{tg}\delta_1$  і  $\operatorname{tg}\delta_2$  в вираз (2), були розраховані значення параметра  $D$  в кожен момент часу, починаючи з моменту введення в експлуатацію. Результати розрахунку відображені на рис. 2.

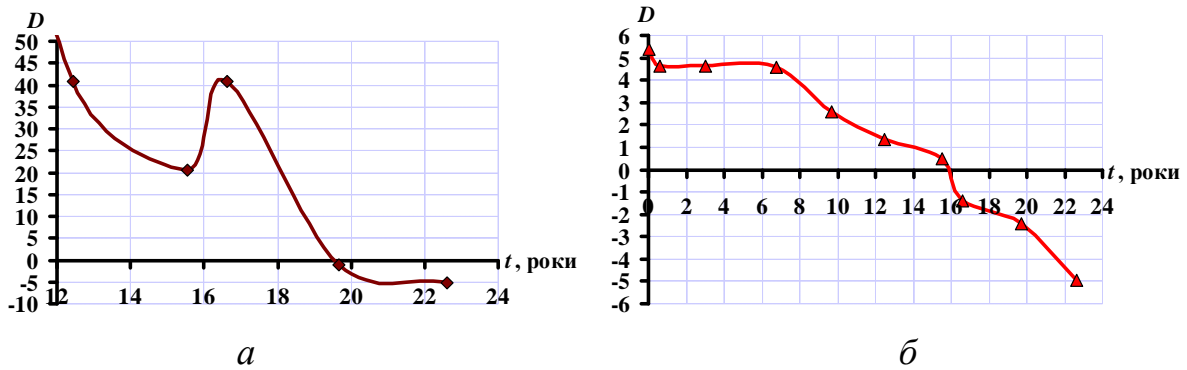


Рисунок 2 – Результати діагностики дефектного вводу ГМТА-110/630-У1 за значеннями  $\text{tg}\delta_1$  (а) і  $\text{tg}\delta_2$  (б) з використанням відношень правдоподібності

Як видно з рис. 1, значення  $\text{tg}\delta_2$  перевищили гранично допустимі значення, встановлені чинним в Україні стандартом в останній точці спостережень, а значення  $\text{tg}\delta_1$  взагалі знаходяться в області значень, відповідних справному стану введення. У той же час, як видно з рис. 2, значення параметра  $D$  розраховані як за значеннями  $\text{tg}\delta_1$  (рис. 2 а), так і  $\text{tg}\delta_2$  (рис. 2 б) мають негативні значення, що згідно з правилом (3), свідчить про появу дефекту у вводі. Принципово важливим є той факт, що поява негативних значень параметра  $D$  має місце ще до того, як значення  $\text{tg}\delta_2$  перевищило гранично допустиме, що дозволяє виявляти пошкодження, що розвиваються відносно повільно на ранній стадії.

### Список використаних джерел:

1. Бондаренко В. Е. Математические основы технической диагностики объектов электрических сетей: учеб. пособ. в двух частях, часть 1 / В. Е. Бондаренко, О. В. Шутенко, Д. Н. Баклай. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – 266 с.
2. Shutenko O. Analysis of distribution laws of insulation indicators of high-voltage oil-filled bushings of hermetic and non-hermetic execution / O. Shutenko, A Zagaynova, G. Serdyukova // Technology audit and production reserves. – 2018. – Iss. 4/1 (42). – PP. 30–39. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.140873.
3. Shutenko O.V., Zagaynova A.A., Serdyukova G.N. Analysis of operating conditions and modes influence on technical state of main insulation of high-voltage bushings of different design / O. Shutenko // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2019. – №1. – PP. 57–66. DOI: 10.20998/2074-272X.2019.1.10.
4. Shutenko O. Determining the maximally permissible values for the indicators of insulation of sealed entrance bushings with a voltage of 110 kv using the method of minimal risk / O. Shutenko, A. Zagaynova, G. Serdyukova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – №5/8 (95). – P. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142185.
5. O. Shutenko, A. Zagaynova Maximum Permissible Value Correction for Dielectric Loss Tangent of 110 kV Air-Tight Bushing Basic Insulation Subject to Operational Factors Impact / 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), September 10-14, 2018, Kharkiv, Ukraine. – PP. 45–50. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559523.

УДК 621.314.212:543.544.3

**РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ ДЕФЕКТІВ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ  
ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ РОЗЧИНЕНИХ В МАСЛІ ГАЗІВ  
В ДІАГНОСТИЧНИХ ПРОСТОРАХ РІЗНОГО ТИПУ****Шутенко О.В., Кулик О.С.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

Рішення про можливість подальшої експлуатації силових трансформаторів приймається на основі аналізу типу прогнозованого дефекту, ступеня його небезпеки і швидкості його розвитку. На сьогодні для розпізнавання типу дефекту за результатами аналізу розчинених в маслі газів (АРГ) використовується кілька діагностичних критеріїв, які утворюють діагностичні простори різного типу. В якості координат діагностичного простору використовуються або відношення характерних газів, або відсотковий вміст газів, або відношення газів до газу з максимальним вмістом [1]. Слід зазначити, що області діагнозів, сформовані за одними і тими ж координатами діагностичного простору в різних методах по інтерпретації результатів АРГ, істотно відрізняються, що може привести до постановки різних діагнозів при діагностиці одного і того ж обладнання. В якості прикладу таких розбіжностей розглянемо результати розпізнавання повзучих розрядів [2] з використанням різних типів діагностичного простору.

В якості вихідних даних були використані результати АРГ по 42 силових трансформаторах, в яких за результатами «розтину» були виявлені сліди поверхневих і повзучих розрядів з різним ступенем інтенсивності. Пред'явлена сукупність даних була діагностована з використанням графічного методу інтерпретації, регламентованого стандартом ІЕС 60599, квадрата ЕТРА, а також трикутника Дюваля. Результати діагностики наведені на рис. 1. Як видно з рисунку використання різного діагностичного простору стосовно об'єктів з одним і тим же діагнозом призводить до різних результатів. При цьому, незважаючи на те, що і стандарт ІЕС 60599 (рис. 1 а), і квадрат ЕТРА (рис. 1 б) в якості координат діагностичного простору використовують відношення газів, але в силу відмінностей в межах областей діагнозів, мають місце розбіжності у типі дефектів, що визначаються даними методами. З трьох аналізованих методів найменше число правильних діагнозів було отримано з використанням трикутника Дюваля (рис. 1 в). Однак результати досліджень, наведені в [3-5], свідчать про те, що достовірність розпізнавання різних методик, що використовують різний діагностичний простір, істотно відрізняється в залежності від типу дефекту. Наприклад, трикутник Дюваля дозволяє більш точно розпізнавати комбіновані дефекти, а стандарт ІЕС 60599 – термічні дефекти і т. д.

Отримані результати свідчать про необхідність коригування норм і критеріїв, що використовуються для розпізнавання типу дефектів за результатами АРГ. На думку авторів, одним із можливих шляхів такого удосконалення є використання комбінованого діагностичного простору, в якості координат якого використо-

вуються як відношення характерних газів, так і відсотковий вміст газів, а також відношення газів до газу з максимальним вмістом.

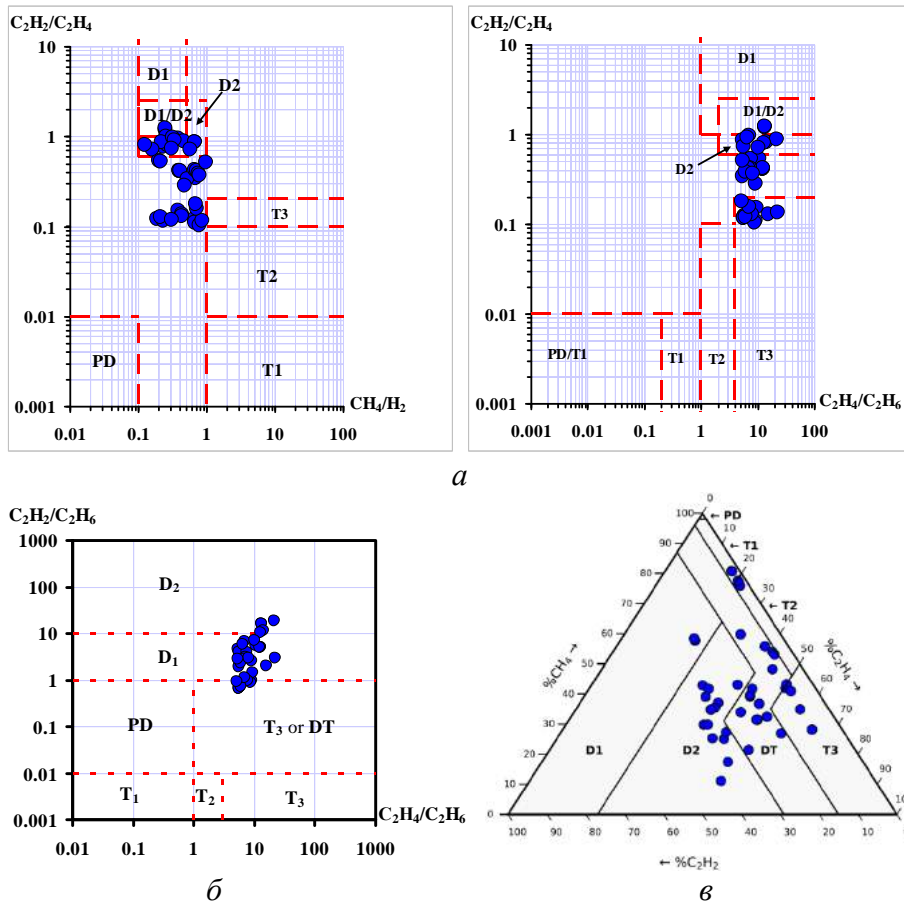


Рисунок 1– Результати діагностики трансформаторів з повзучими розрядами з використанням графічного методу за стандартом ІЕС 60599 (а), квадрата ЕТРА (б) і трикутника Дюваля (в)

### Список використаних джерел:

1. Shutenko O., Kulyk O. Comparative Analysis of the Defect Type Recognition Reliability in High-Voltage Power Transformers Using Different Methods of DGA Results Interpretation / 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). – IEEE, 2020. – P. 1–6. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240911.
2. Kulyk O. S., Shutenko O. V. Analysis of Gas Content in Oil-Filled Equipment with Spark Discharges and Discharges with High Energy Density / Transactions on Electrical and Electronic Materials. – 2019. – Vol. 20, iss. 5. – P. 437–447. DOI: 10.1007/s42341-019-00124-8.
3. Shutenko O., Kulyk O. Analysis of Gas Content in Oil-Filled Equipment with Low Energy Density Discharges / International Journal on Electrical Engineering and Informatics. – 2020. – Vol. 12, no. 2.– P. 258–277. DOI: 10.15676/ijeei.2020.12.2.6.
4. Shutenko O., Kulyk O. Combined Defects Recognition in the Low and Medium Temperature Range by Results of Dissolved Gas Analysis / 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – IEEE, 2020. – P. 65–70. DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250131.
5. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of Mid-Temperature Overheating in High-Voltage Power Transformers by Dissolved Gas Analysis / 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – 2021. – P. 401–406. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570059.

УДК 621.315.615.2

**АНАЛІЗ ХАРАКТЕРУ ЗМІНИ ПОКАЗНИКІВ МАСЕЛ В ПРОЦЕСІ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ****Шутенко О.В., Пономаренко С.Г., Холодний О.Г.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Україна, м. Харків*

При оцінці стану ізоляції високовольтного маслонаповненого обладнання принципово важливо, враховувати особливості фізичних процесів, які розвиваються протягом тривалої експлуатації. Одним з можливих способів дослідження таких процесів, є аналіз результатів періодичних випробувань стану ізоляції високовольтного обладнання. Однак, такий аналіз вимагає попередньої статистичної обробки результатів випробувань. У даній роботі наводиться процедури статистичної обробки результатів періодичних випробувань стану трансформаторних масел. Як приклад розглянемо такий показник як колір трансформаторних масел. В якості вихідних даних були використані результати періодичних випробувань по 121 трансформатору напругою 110 кВ. обсяг аналізованої вибірки склав 2108 значень. Результати випробувань були представлені у вигляді двовимірного масиву значення кольору масла на тривалість експлуатації. На першому етапі досліджень з вихідного масиву даних були видалені стаціонарні за математичним очікуванням, часові ряди, тобто ті ряди, для яких зростанням тривалості експлуатації значення кольору не змінювалося. Для цих цілей був використаний алгоритм тестової фільтрації, розроблений в [1]. На другому етапі досліджень були сформовані масиви з близькою швидкістю старіння масла, тобто з близькими значеннями кольору трансформаторного масла в один і той же момент часу. Для цих цілей був використаний критерій максимуму кореляційного відношення (характеризує наявність нелінійного зв'язку між двома випадковими величинами), запропонований в [2]. В результаті були сформовані 6 масивів показників з близькою швидкістю старіння масел. У табл. 1 наведені значення коефіцієнта парної кореляції і кореляційного відношення між кольором масла і тривалістю експлуатації для масивів даних на різній стадії обробки. Масив  $M_a$  являє собою масив вихідних даних, масив  $M_f$  це масив даних після тестової фільтрації, а масиви  $M-1 \dots M-6$  масиви з близьким значенням дрейфу кольору масел, отримані за критерієм максимуму кореляційного відношення. Як видно з табл. 1 на кожному етапі статистичної обробки спостерігається збільшення значень як коефіцієнта парної кореляції, так і прямого і зворотного кореляційних відносин. Дана обставина свідчить про високу ефективність запропонованої процедури статистичного аналізу. Отримані масиви з близькою швидкістю дрейфу кольору трансформаторних масел були перевірені на відхилення від лінійності. Для цього за аналогією з [3] була використана модель дисперсійного аналізу на відхилення від лінійності. Математичне очікування показника трансформаторного масла  $Y_t$  при заданому значенні тривалості експлуатації  $X_t$  можна представити у вигляді:

$$E(Y_t/x_t) = \alpha + \beta \cdot X_t + \delta_t, \quad (1)$$

де:  $\delta_t$  – відхилення від лінійності

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта парної кореляції і кореляційного відношення між показниками якості масла і часом експлуатації для масивів даних на різній стадії обробки

Масив	n	N	Коефіцієнт парної кореляції $\rho_{y-t}$	Кореляційне відношення	
				$\eta_{t/y}$	$\eta_{y/t}$
М <sub>a</sub>	121	2108	0,346	0,441	0,410
М <sub>r</sub>	76	1558	0,546	0,608	0,616
М1	23	452	0,911	0,930	0,913
М2	11	166	0,942	0,953	0,944
М3	11	294	0,825	0,906	0,825
М4	18	350	0,902	0,911	0,911
М5	2	30	0,900	0,938	0,943
М6	9	250	0,847	0,936	0,875

Повну суму квадратів  $Q_{\text{пов.}}$  можна розбити на суму квадратів між групами  $Q_1$  і суму квадратів всередині груп  $Q_{\text{зал.}}$ :

$$Q_{\text{пов.}} = Q_1 + Q_{\text{зал.}}$$

або

$$\sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{ti} - \bar{Y})^2 = \sum_{t=1}^k n_t (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2 + \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{ti} - \bar{Y}_t)^2. \quad (2)$$

У свою чергу суму квадратів між групами можна розбити на дві: суму квадратів для лінійної регресії і суму квадратів для середніх даного плану щодо регресії:

$$\sum_{t=1}^k n_t (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2 = B^2 \sum_{t=1}^k n_t (x_t - \bar{x})^2 + \sum_{t=1}^k n_t [\bar{Y}_t - \bar{Y} - B(x_t - \bar{x})]^2, \quad (3)$$

де

$$B = \frac{\sum_{t=1}^k n_t x_t (\bar{Y}_t - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^k n_t (x_t - \bar{x})^2}; \quad \bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^k n_t x_t}{\sum_{t=1}^k n_t}.$$

Лінійність регресії перевірялася шляхом порівняння відношення:  $F = (\text{Середній квадрат відхилення від лінійності}) / (\text{залишковий середній квадрат})$  з  $F$ -розподілом з  $k-2$ ,  $\sum_{t=1}^k n_t - k$  – ступінь свободи.

Результати дисперсійного розкладання наведені в таблиці 2. Як видно з табл. 2 для всіх 6 масивів кольору трансформаторного масла, відхилення від лінійності визнаються значущими, тобто гіпотеза про прийнятність лінійної регресії відкидається., що наочно ілюструють залежності на рис. 1. Як видно з рисунка на наведених залежностях можна виділити два характерних ділянки: ділянка індукційного

періоду (дивись горизонтальні ділянки залежностей на рис. 1) у цей період відбувається утворення і накопичення первинних продуктів окислення, і період самоускорення який супроводжується зростанням значення показника (дивись зростаючі ділянки залежностей на рис. 1), який обумовлений утворенням і зростанням концентрації продуктів більш глибокого окислення, в першу чергу смол. Тривалість індукційного періоду в різних підмножинах і інтенсивність зростання колірному числа масел відрізняються, що свідчить про різні умови експлуатації масла [4].

Таблиця 2 – Результати перевірки залежностей кольору трансформаторних масел від тривалості експлуатації на відхилення від лінійності

Масив даних	k	N	Суми дисперсійного розкладання				Число ступенів свободи		F - критерій	
			$Q_{пов.}$	$Q_{лін. рег}$	$Q_{відх.}$	$Q_{зал.}$	$V_{відх.}$	$V_{зал.}$	$F_{роз.}$	$F_{крит.}$
М-1	13	452	547.387	446.128	10.823	90.436	11	439	4.775	1.81
М-2	7	166	421.483	356.616	17.066	47.801	5	159	11.352	2.27
М-3	12	294	63.432	41.71	7.553	14.169	10	282	15.032	1.86
М-4	10	350	241.174	190.364	4.803	46.007	8	340	4.437	1.97
М-5	3	30	78.0416	50.1937	6.1089	21.739	1	27	7.586	4.21
М-6	12	250	381.089	270.949	48.62	61.52	10	238	18.809	1.87

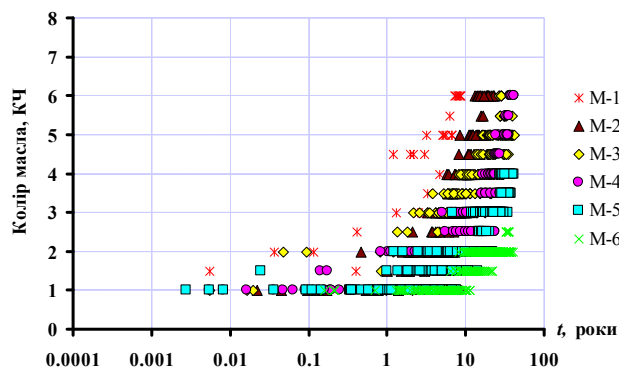


Рисунок 1 – Залежності кольору трансформаторного масла від тривалості експлуатації

### Список використаних джерел:

1. Shutenko O., Ponomarenko S. Reliability Assessment of the Results of Periodic Monitoring of the Transformer Oils Condition //2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – IEEE, 2020. – P. 77–82. DOI: 10.1109/IEPS51250.2020.9263141.
2. Шутенко О.В. Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний / О.В. Шутенко // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 4. – С. 42–50.
3. Шутенко О.В. Особенности дрейфа показателей качества трансформаторного масла в течении длительной эксплуатации / О.В. Шутенко // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 4. – С. 26–30.
4. Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of the Impact of Power Transformer Loading on the Transformer Oil Aging Intensity //2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – IEEE, 2020. – С. 76–81. DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250159.

УДК 621.311

**АНАЛІЗ СПОСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ****Щербак І.Є., Чміль І.Ю.***Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова, Україна, м. Харків*

Актуальною проблемою в галузі якості електричної енергії є несинусоїдальність напруги в електричних мережах. Несинусоїдальність напруги характеризується двома основними показниками: коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги та коефіцієнтом  $n$ -ої гармонійної складової напруги. Вимоги міжнародного стандарту ГОСТ 13109-97 щодо коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги зазначають, що нормальне значення показника повинно становити не більше 8% та граничне значення показника до 12% [1, 2].

Причиною несинусоїдальних режимів є електроустаткування з нелінійними вольт-амперними характеристиками, яке споживає з мережі струм несинусоїдальної форми.

Гармоніки напруги викликають:

- у трансформаторах збільшення втрат на гістерезис і втрат, пов'язаних з вихровими струмами в сталі, а також втрат в обмотках;
- у генераторів та двигунів підвищення загальної температури, місцеві перегріву, що найбільш ймовірні у роторі, а також скорочення терміну роботи ізоляції;
- у проводів та кабелів збільшення експлуатаційної температури та посилене старіння ізоляції;
- в конденсаторах збільшення діелектричних втрат при високій робочій температурі та зниження надійності їхньої роботи;
- в електровимірювальних приладах похибки вимірювань, зменшення точності вимірювання коефіцієнта потужності;
- в релейному захисті помилкові спрацьовування внаслідок додаткового нагрівання внутрішніх елементів захисних пристроїв.

Створення моделей для представлення електричних мереж та нелінійних навантажень у обчислювальних програмах дозволить виконати аналіз та розробку технічних заходів для підтримки параметрів режимів гармонік відповідно до вимог нормативних документів.

Аналіз способів моделювання нелінійних навантажень показав, що можливе створення математичної моделі кожного нелінійного пристрою або групи нелінійних пристроїв як еквівалентного нелінійного навантаження, що є джерелами гармонік струму. У табл. 1 наведено способи моделювання нелінійних пристроїв.

Таблиця 1 – Класифікація способів моделювання нелінійних пристроїв

Моделі нелінійних пристроїв								
Моделі феромагнітних пристроїв			Моделі дугових пристроїв		Моделі електронних пристроїв			
- силові трансформатори, - синхронні машини, - асинхронні двигуни			Електродугові печі		- випрямні перетворювачі, - статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності			
Моделі у вигляді еквівалентної схеми заміщення	Модель у часовій або частотній областях	Модель в частотній та часовій області	Моделі в яких нелінійні пристрої надаються нелінійними елементами	Моделі в яких нелінійні пристрої подаються нелінійними вольт-амперними характеристиками	Модель джерела струму	Модель у часовій або частотній областях	Модель еквівалентної схеми з джерелом струму	Модель на основі функцій передачі

В зв'язку із зростанням кількості та видів електрообладнання з нелінійними вольт-амперними характеристиками моделювання пристрою чи групи пристроїв для розрахунку режимів гармонік в електричних мережах виявляється складною задачею.

Режими гармонік в електричних мережах є випадковими та параметри їхніх режимів мають імовірнісний характер, що визначається конфігурацією мережі, складом її елементів, кількістю нелінійних навантажень, фазами струмів джерел гармонік, змінами режимів роботи, потужностей навантажень та іншими факторами.

В умовах безперервного зростання кількості видів, потужностей нелінійного електрообладнання найбільш доцільним є моделювання нелінійних навантажень, в якому враховується випадковість режимів гармонік та імовірнісний характер їх параметрів на основі результатів вимірювань.

У вузлі приєднання нелінійного навантаження для його моделювання повинні бути виміряні наступні параметри режимів гармонік: коефіцієнти гармонічних складових напруги та струму  $-K_{U(n)}, K_{I(n)}$ , діючі значення гармонік напруги та струму  $-U_n, I_n$ , величини фазових кутів гармонік напруги та струму  $- \varphi_{Un}, \varphi_{In}$ .

Проаналізувавши методи моделювання нелінійних навантажень обрано моделювання, що враховує імовірнісний характер режимів гармонік на основі результатів вимірювань, що найбільш повноцінно описує процеси в електричних мережах.

### Список використаних джерел:

1. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристика напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.
2. СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-55\_2011. Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення.

*Наукове видання*

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

**V Міжнародної науково-технічної конференції**

**«ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ (EEES-2021)»**

Відповідальний за випуск: Довгалюк О. М.

Тех. редактор – Гобельовська Л. П.

Підписано до друку 19.11.2021 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура шкільна. Друк цифровий.  
Ум. друк. арк. 6,86. Тираж 100 прим. Зам № 3186.



Видавець та виготовлювач ТОВ «Друкарня Мадрид»  
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18. Тел.: 0800-33-67-62  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: Серія ДК № 4399 від 27.08.12 р.  
[www.madrid.in.ua](http://www.madrid.in.ua) [info@madrid.in.ua](mailto:info@madrid.in.ua)

