

*Є. Ю. КОЛЕНЧЕНКО, В. М. БЕЗРУЧКО, Р. О. БУЙНИЙ, І. В. ДІХТЯРУК*

### **ЗМЕНШЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ПІДГРІВ МАСЛЯНИХ ВИМИКАЧІВ 35–110 КВ В АТ «ЧЕРНІГІВ ОБЛЕНЕРГО»**

Проведено аналіз стану парку вимикачів 35–110 кВ Чернігівської області, що знаходяться на балансі оператора системи розподілу АТ «ЧЕРНІГІВ ОБЛЕНЕРГО». Встановлено, що кількість вимикачів, які відповідають вимогам діючих нормативних документів, складає лише 18,9 % в мережах 35 кВ та 2 % в мережах 110 кВ. Більшість вимикачів 35–110 кВ, що знаходяться на балансі, є маломасляними та баковими і потребують підігріву в зимовий період. В роботі оцінюється річна тривалість роботи обігріву вимикачів та їх приводів в залежності від обраної уставки температури його увімкнення та інтервалу усереднення температури навколишнього середовища, а також відповідна величина технологічних витрат електричної енергії. Розглядаються заходи зменшення технологічних витрат на обігрів як-от оптимізація системи керування обігрівом, заміна масляних вимикачів на сучасні вакуумні та елегазові, які потребують менших витрат, а також одночасне впровадження двох вищезазначених заходів. Ефективність вищезазначених заходів оцінювалася за дисконтованим грошовим потоком, який враховує не тільки інвестиції та поточний річний чистий прибуток, але й експлуатаційні витрати та норму дисконту. Показано, що усі вищезазначені заходи є ефективними. Зокрема, найменш затратною є модернізація системи керування обігрівом, що окупиться протягом трьох років експлуатації. Термін окупності заходів із заміни усіх масляних вимикачів 35–110 кВ в АТ «ЧЕРНІГІВ ОБЛЕНЕРГО» на сучасні вакуумні та елегазові складає близько 6,5 років, проте цей захід потребує значних інвестицій. Розтягування у часі інвестицій із заміни вимикачів призведе до зменшення ефективності даного заходу через великі технологічні витрати на підігрів масляних вимикачів, що будуть знаходитися в експлуатації.

**Ключові слова:** масляні вимикачі, технологічні витрати електроенергії, експлуатаційні витрати, інвестиції, дисконтований грошовий потік.

*Е. Ю. КОЛЕНЧЕНКО, В. М. БЕЗРУЧКО, Р. А. БУЙНИЙ, И. В. ДИХТЯРУК*

### **УМЕНЬШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОДОГРЕВ МАСЛЯНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ 35–110 КВ В АО «ЧЕРНИГОВОБЛЭНЕРГО»**

Проведен анализ состояния парка высоковольтных выключателей 35–110 кВ Черниговской области, находящихся на балансе оператора системы распределения АО «Черниговоблэнерго». Установлено, что количество выключателей, которые соответствуют требованиям действующих нормативных документов, составляет всего лишь 18,9 % в сетях 35кВ и 2 % в сетях 110 кВ. Большинство выключателей 35–110 кВ, находящихся на балансе, являются маломасляными и баковыми и требуют подогрева в зимний период. В работе оценивается годовая продолжительность работы обогрева выключателей и их приводов в зависимости от выбранной уставки температуры его включения и интервала осреднения температуры окружающей среды, а также соответствующая величина технологического расхода электроэнергии. Рассматриваются такие меры уменьшения технологических затрат на обогрев, как оптимизация системы управления обогревом, замена масляных выключателей на современные вакуумные и элегазовые, которые требуют меньших затрат; а также одновременное введение двух вышеупомянутых мероприятий. Эффективность вышеупомянутых мероприятий оценивалась по дисконтированному денежному потоку, который включает не только величину инвестиций и текущую годовую чистую прибыль, но и эксплуатационные расходы и норму дисконта. Показано, что все вышеуказанные меры являются эффективными. В частности, наименее затратной является модернизация системы управления обогревом, она окупится в течение трех лет эксплуатации. Срок окупаемости мероприятий по замене всех масляных выключателей 35–110 кВ в АО «Черниговоблэнерго» на современные вакуумные и элегазовые составляет около 6,5 лет, однако это мероприятие требует значительных инвестиций. Растяжение во времени инвестиций по замене выключателей приведет к уменьшению эффективности данного мероприятия из-за большого технологического расхода на обогрев масляных выключателей, которые будут находиться в эксплуатации.

**Ключевые слова:** масляные выключатели, технологический расход электроэнергии, эксплуатационные расходы, инвестиции, дисконтированный денежный поток.

*Y. KOLENCHENKO, V. BEZRUCHKO, R. BUINYI, I. DIHTYARUK*

### **REDUCTION OF ENERGY LOSSES ON HEATING OIL CIRCUIT BREAKERS 35–110 KV IN JSC «CHERNIGIVOBLENREGO»**

The analysis of the state of 35–110 kV circuit breakers in the Chernihiv region, which are on the balance sheet of the operator of the distribution system JSC «Chernigivoblenergo», has been carried out. It was shown that the number of circuit breakers that satisfy regulatory documents is only 18.9 % in 35 kV and 2 % in 110 kV power networks. Unfortunately, most of the 35–110 kV circuit breakers in the Chernihiv region are low-oil and bulk-oil type, which required heating during cold meteorological conditions. The article assess the duration of the circuit breakers heating and their drives, depending on the selected set point of the temperature and the averaging interval of the ambient temperature, and the value of technological energy losses. The article considers following ways to reduce technological costs for heating: optimization of the heating control system, replacement of oil circuit breakers with modern vacuum and SF<sub>6</sub> circuit breakers, which require lower costs on heating, and applied both above ways. The effectiveness of the above ways was done with apply Net Present Value, which includes not only investments and Net Profit Margin, but also operating costs and Discount Rates. It has been shown that all of the above ways are effective. In particular, the least costly is the modernization of the heating control system, which has payback period is low three years. The payback period for second way to replace all 35–110 kV oil circuit breakers with modern ones at JSC «Chernigivoblenergo» is about 6.5 years, but this way requires large investments. However, this way cannot be done in one year. Therefore effectiveness will be less due to energy losses to operated oil circuit breakers.

**Keywords:** oil circuit breakers, technological energy losses, operational costs, investments, net present value.

**Вступ.** На сьогоднішній день в АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО» та інших операторів систем розподілу в електричних мережах 35–110 кВ у експлуатації знаходиться значна кількість масляних вимикачів, що були введені у роботу понад 40 років тому.

Особливою «популярністю» користуються маломасляні вимикачі марок ВМК-35, ВМУЭ-35, ВМПП-35, ММО-110 та масляні бакові – МКП-35, У-110, МКП-110.

Комутаційний ресурс таких вимикачів практично повністю вичерпаний, а продовження терміну їх надійної експлуатації шляхом профілактичних та капітальних ремонтів не дозволяє вирішити зазначену проблему в повному обсязі.

Заміна масляних вимикачів на класі напруги 35 кВ виконується операторами систем розподілу тільки вибірково – для підстанцій, які живлять особливо відповідальних споживачів. Така заміна виконується за кошти інвестиційної програми оператора систем розподілу, оскільки коштів від амортизаційних відрахувань недостатньо через ряд історичних причин. Заміна масляних вимикачів на напрузі 110 кВ взагалі практично не виконується, оскільки їх вартість є суттєвою.

В усіх типів та марок масляних вимикачах масло є дугогасним середовищем, а у масляних бакових – воно також виступає у якості діелектрика. Вищезазначене є головним недоліком даних вимикачів, оскільки за маслом потрібен постійний контроль та часте обслуговування через необхідність підтримання пожежної безпеки. Також масло та приводи таких вимикачів потребують обігріву у холодну пору року [1]. Електропідігрівання повинно вмикатися, коли температура навколишнього середовища опускається нижче, ніж +5 °С. Увімкнення та вимкнення електропідігрівачів на підстанціях 35–110 кВ в даний час повинно здійснюватися автоматично.

На сьогодні діючими нормативними документами, зокрема [2], вимагається обов'язкова заміна масляних вимикачів на сучасні вакуумні та елегазові під час реконструкції існуючих підстанцій 35–110 кВ. Сучасні вимикачі також потребують електрообігріву у холодну пору року, але тільки їх приводів.

Законодавча політика України в області нормування технологічних витрат електричної енергії поки що є недостатньо жорсткою [3]. Тому технічні фахівці операторів систем розподілу та їх керівництво поки що не задумуються про величину витрат у грошовому еквіваленті на експлуатацію масляних вимикачів, однією зі складових якої є технологічні витрати на підігрів масла у зимовий період.

Проблемі зменшення технологічних витрат електричної енергії в електричних мережах присвячено багато робіт. Зокрема в [4] запропонована універсальна математична модель електричної мережі напругою 0,38 кВ для розрахунку витрат потужності і електричної енергії на основі інформації про втрати напруги. В роботах [5–6] розглянуто шляхи зменшення технологічних витрат електричної енергії за рахунок

переходу на більш високий клас напруги та за рахунок зменшення щільності струму у кабелях.

У роботах [7–8] розглядається стратегія мінімізації втрат енергії розподільних мереж, яка базується на імітаційній моделі та дозволяє виявляти не тільки технічні втрати електричної енергії, але і комерційні. Вирішення проблеми оптимального управління режимами роботи міської електричної мережі м. Мілан задля мінімізації втрат потужності розглядається у [9]. У роботі [10] піднімається питання мінімізації технологічних витрат на районних підстанціях у Нігерії, проте проблема необхідності підігріву високовольтних вимикачів та їх приводів у них не розглядається через інші кліматичні умови. У роботі [11] розглядається застосування інформаційних технологій для ефективного планування заходів зі зменшення технологічних витрат електричної енергії.

Аналіз літературних джерел показав, що вирішенню проблеми зменшення технологічних витрат електричної енергії на підігрів високовольтного обладнання присвячена незначна кількість публікацій, які не вирішують в повній мірі вищезазначену проблему в електричних мережах 35–110 кВ операторів систем розподілу.

**Мета роботи.** Зменшення технологічних витрат електричної енергії на підігрів масляних вимикачів в мережах 35–110 кВ операторів систем розподілу України на прикладі АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО».

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз схем електричних з'єднань ПС 35–110 кВ АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО» показав, що на балансі товариства знаходиться 305 одиниць масляних вимикачів напругою 35 кВ та 48 одиниць напругою 110 кВ, що складає 81,1 % та 98,0 % від загальної кількості вимикачів на напрузі 35 та 110 кВ відповідно.

До табл. 1 зведені кількості маломасляних та масляних бакових вимикачів різних марок, які знаходяться в експлуатації в АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО» станом на кінець 2020 р.

Таблиця 1 – Кількість масляних вимикачів, що знаходяться в експлуатації на підстанціях АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО»

Тип вимикача	Марка вимикача 35 кВ	Кількість, шт	Марка вимикача 110 кВ	Кількість, шт
Мало-масляні	ВМУЭ-35	1	ММО-110	22
			ВМТ-110	15
Масляні бакові	МКП-35	2	МКП-110	7
	С-35	109		
	ВМД-35	4		
	ВТД-35	2	У-110	4
	ВТ-35	163		
ВМ-35	24			

Швидкість та інтенсивність гасіння електричної дуги у масляних високовольтних вимикачах 35–110 кВ залежить від швидкості розходження їх контактів. При високій швидкості розходження контактів дуга швидко досягає своєї критичної довжини, при якій повторного перекриття проміжку не відбувається.

Швидкість руху контактів залежить від в'язкості масла у вимикачі, тому зі зниженням температури відключення вимикача уповільнюється, що може призвести до розриву його бака. Також, за низьких температур, у приводах усіх типів вимикачів, що знаходяться в експлуатації просто неба, може утворюватися конденсат. Тому масляні вимикачі та їх приводи потребують підігріву у зимовий період, коли температура навколишнього середовища опускається нижче, ніж  $+5^{\circ}\text{C}$  [1]. На це може витрачатися значна кількість електричної енергії, яка, в даний час, може бути тільки оцінена розрахунковим шляхом.

Технологічні витрати електричної енергії на обігрів одного масляного вимикача  $i$ -го типу за рік експлуатації можна розрахувати за формулою:

$$W_{MB.Oi} = P_{OMi} \cdot T_{OMi} + P_{OPPi} \cdot T_{OPPi}, \quad (1)$$

де  $P_{OMi}$ ,  $P_{OPPi}$  – номінальні потужності елементів обігріву масла та приводу вимикача;

$T_{OMi}$ ,  $T_{OPPi}$  – тривалості роботи нагрівних елементів масла та приводу протягом року.

Загальні технологічні витрати електричної енергії на підігрів масляних вимикачів різних типів в цілому по мережі оператора системи розподілу за рік експлуатації можна розрахувати за формулою:

$$W_{MB.O\Sigma} = \sum_{i=1}^k W_{MB.Oi} \cdot n_i, \quad (2)$$

де  $n_i$  – кількість вимикачів  $i$ -го типу, що знаходилася в експлуатації протягом року;

$k$  – загальна кількість типів вимикачів, що знаходилася в експлуатації протягом року.

Для розрахунку технологічних витрат електричної енергії на підігрів вимикачів зібрана статистична ретроспективна інформація про середньорічні коливання температури повітря на території Чернігівської області за 2014–2019 рр. На рис. 1 представлений графік зміни середньодобової температури протягом 2019 року, який отримано шляхом усереднення ретроспективних температурних замірів через тригодинні інтервали [12].



Рисунок 1 – Графік зміни середньодобової температури за 2019 рік на території Чернігівської області

Аналіз вихідної інформації по температурним замірам через тригодинні інтервали дозволив розрахувати середню за 6 років (з 2014 по 2019 рік) кількість годин роботи обігріву протягом року ( $t_{обігр.}$ ), залежно від уставки його увімкнення по температурі, за формулою:

$$t_{обігр.} = \frac{\sum_{k=1}^6 (\sum_{i=1}^N \Delta t_{kiT < T_{ycm}})}{6}, \quad (3)$$

де  $\Delta t_{kiT < T_{ycm}}$  – тривалість інтервалу часу у  $k$ -му році та на  $i$ -му інтервалі усереднення, на яких відома температура  $T$  виявляється меншою за температурну уставку увімкнення обігріву  $T_{ycm}$ ;

$N$  – кількість інтервалів усереднення температури.

Усереднення інформації за 6 років дозволяє знівелювати відмінності температурних коливань протягом ретроспективного періоду.

Результати таких розрахунків, отримані за температурними замірами через кожні 3 години та середньодобовими температурами, представлені на рис. 2 та 3.

Для спрощення подальших міркувань отримані апроксимації залежностей виду  $t_{обігр.} = f(T_{ycm})$  у вигляді кубічного поліному:

$$t_{обігр.} = a_0 + a_1 \cdot T_{ycm} + a_2 \cdot T_{ycm}^2 + a_3 \cdot T_{ycm}^3, \quad (4)$$

де  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – константи.

Коефіцієнт достовірності апроксимації (коефіцієнт детермінації)  $R^2$  розрахований за наступною формулою [13]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (5)$$

де  $y_i$  – фактичне значення величини, отримане за статистичними даними;

$\hat{y}_i$  – значення величини, розраховане за отриманим рівнянням апроксимації;

$\bar{y}$  – середнє значення величини, отримане за статистичними даними.

$n$  – кількість заданих точок у вхідній вибірці з даними.



Рисунок 2 – Залежність середньої тривалості роботи обігріву від температурної уставки увімкнення (отримана за температурними замірами через кожні 3 год) та її апроксимація поліномом

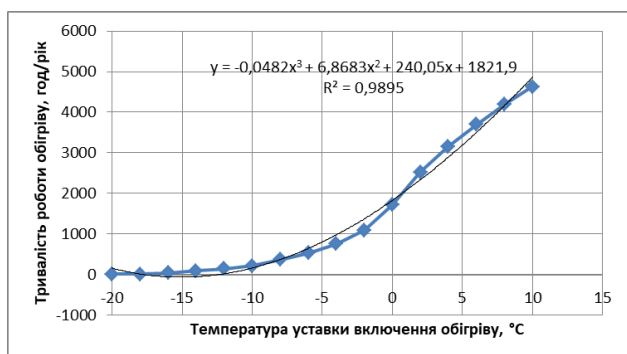


Рисунок 3 – Залежність середньої тривалості роботи обігріву від температурної уставки увімкнення (отримана за середньодобовими температурами) та її апроксимація поліномом

З рис. 2 та 3 видно, що для обох випадків усереднення температури коефіцієнт достовірності апроксимації достатньо високий і наближається до 1 (складає 0,9899 та 0,9895). Це дозволяє стверджувати, що отриманими поліномами можна користуватися для подальших розрахунків технологічних витрат електричної енергії на підігрів масляних вимикачів.

Слід зазначити, що контроль увімкнення/вимкнення обігріву вимикачів та їх приводів можна виконувати за різними інтервалами усереднення температури, наприклад за усереднення через три години, через добу тощо. Причому, при несуттєвому збільшенні інтервалу усереднення ніякого впливу на експлуатаційну надійність вимикача відбуватися не буде, оскільки процеси нагріву та охолодження є інерційними процесами (особливо це стосується підігріву масла у бакових вимикачах).

Дослідження показали, що чим вища температура уставки увімкнення обігріву вимикачів, тим менше розсіювання (середньоквадратичне відхилення) тривалості роботи обігріву протягом року від середнього значення. Так, за температури уставки увімкнення обігріву +5 °C слід очікувати, що обігрів буде працювати:

- 3816±333,7 год/рік – за усереднення через три доби;

- 3472,0±193,3 год/рік – за усереднення через одну добу;
- 3499,5±202,9 год/рік – за усереднення через три години.

Це дало можливість оцінити величини технологічних витрат електричної енергії на обігрів вимикачів та їх приводів (табл. 2) за паспортних потужностей нагрівальних елементів вимикачів, наведених у табл. 3.

Таблиця 2 – Результати розрахунку річної кількості електричної енергії, яка витрачається на обігрів масляних вимикачів та їх приводів

Інтервал усереднення температури	Величина технологічних витрат електричної енергії на обігрів вимикачів та їх приводів, кВт·год/рік			
	35 кВ		110 кВ	
	мало-маляні	бакові	мало-маляні	бакові
Три доби	5724,0 ±500,5	17172,0 ±1501,7	12211,2 ±1067,8	54187,2 ±4738,5
Одна доба	5208,0 ±290,0	15624,0 ±869,9	11110,4 ±618,6	49302,4 ±2744,9
Три години	5249,3 ±304,4	15747,8 ±913,1	11198,4 ±649,3	49692,9 ±2881,2

Таблиця 3 – Паспортні потужності нагрівальних елементів масляних вимикачів та їх приводів

Марка вимикача (тип)	Паспортні потужності нагрівальних елементів, кВт	
	вимикача	приводу
МКП-35 (баковий)	4	0,5
ВМК-35 (маломасляний)	1	0,5
МКП-110 (баковий)	12	2,2
ММО-110 (маломасляний)	1	2,2

З табл. 2 видно, що найбільшої кількості електроенергії на обігрів потребують бакові вимикачі, що обумовлено великим об'ємом масла. Також встановлено, що на величину технологічних витрат електроенергії впливає інтервал усереднення температури. Так за усереднення температури протягом трьох діб, яке в даний час застосовується в АТ «ЧЕРНІГІВОВАБЛЕНЕРГО» з подальшим ручним увімкненням підігріву на ПС черговим та виїзним персоналом, споживання найбільше. Воно, в середньому, більше на 9,5 %, ніж у випадку застосування усереднення температури протягом однієї доби або 3-х годин.

Використовуючи дані табл. 1 та 2 розраховано очікувану річну кількість електричної енергії, яка витрачається на підігрів маломасляних та бакових вимикачів та їх приводів в цілому по компанії АТ «ЧЕРНІГІВОВАБЛЕНЕРГО» для трьох вищезазначених варіантів контролю увімкнення обігріву (табл. 4).

Таблиця 4 – Розрахункові технологічні витрати електричної енергії на обігрів масляних вимикачів та їх приводів в цілому по АТ «ЧЕРНІГІВОБЛЕНЕРГО»

Інтервал усереднення температури	Величина технологічних витрати електричної енергії на обігрів, тис. кВт·год/рік
Три доби	6274±549
Одна доба	5708±318
Три години	5754±334

За 2019 календарний рік АТ «ЧЕРНІГІВОБЛЕНЕРГО» виконало розподіл електричної енергії по своїм мережам у загальній сукупності 1,974 млн. МВт·год/рік. Це вказує на те, що технологічні витрати електричної енергії тільки на обігрів масляних вимикачів та їх приводів в цілому по компанії можуть сягати 0,27–0,35 % від обсягу електричної енергії, що надходить в електричну мережу. Тобто у загальних сумарних технологічних витрат електричної енергії по компанії АТ «ЧЕРНІГІВОБЛЕНЕРГО», які за 2019 рік склали 13,84 %, 0,27–0,35% – це технологічні витрати електричної енергії на обігрів масляних вимикачів 35–110 кВ та їх приводів.

В даний час, згідно з [2], під час реконструкції існуючих та спорудженні нових ПС необхідно встановлювати сучасні вимикачі, які потребують тільки підігріву приводу:

- вакуумні – на напругах до 35 кВ;
- елегазові – на напругах 110 кВ та більше.

Тому, для подальших техніко-економічних розрахунків отримані технологічні витрати електричної енергії на обігрів сучасних вимикачів та їх приводів для 3-х варіантів контролю уставки температури увімкнення обігріву (табл. 5).

Під час розрахунків використано паспортні параметри сучасних вимикачів марок:

- ВР35НСМ та ВБ4-П-35 – на напругу 35 кВ;
- ВГП-110 П-20/2500 УХЛ 1 та ЛТВ 145D1/В – на напругу 110 кВ.

Потужність нагрівальних елементів приводів у сучасних вакуумних та елегазових вимикачів в середньому складає  $P_{опрв} = 0,05$  кВт.

Таблиця 5 – Результати розрахунку річної кількості електричної енергії, яка витрачається на обігрів приводів сучасних вимикачів

Інтервал усереднення температури	Величина технологічних витрат електричної енергії на обігрів приводів вимикачів, кВт·год/рік
Три доби	190,8±16,7
Одна доба	173,6±9,7
Три години	175,0±10,1

Аналізуючи дані табл. 2 та 5 можна побачити, що сучасні вимикачі потребують значно менших витрат електричної енергії на обігрів.

Із зазначеного вище випливає, що для зменшення технологічних витрат електроенергії на обігрів вимикачів та їх приводів можна запропонувати наступні заходи:

- оптимізація системи керування обігрівом;
- заміна масляних вимикачів на сучасні вакуумні та елегазові;
- одночасне запровадження двох вищезазначених заходів.

Результати розрахунку річної економії електричної енергії у випадку запровадження кожного із вищезазначених заходів представлені в табл. 6–8.

Таблиця 6 – Результати розрахунку економії електричної енергії при зміні базового контролю усереднення температури уставки спрацювання протягом 3-х діб на новий

Новий інтервал усереднення температури	Значення економії електричної енергії, кВт·год/рік, при зміні усереднення температури уставки спрацювання для вимикачів			
	35 кВ		110 кВ	
	бакових	мало-масляних	бакових	мало-масляних
Одна доба	1548,0 ±631,8	516,0 ±210,6	4884,8 ±1993,7	1100,8 ±449,3
Три години	1424,3 ±588,6	474,8 ±196,2	4494,3 ±1857,4	1012,8 ±418,6

Таблиця 7 – Результати розрахунку економії електричної енергії при зміні масляних вимикачів 35–110 кВ на сучасні вакуумні та елегазові

Значення економії електричної енергії, кВт·год/рік, при заміні вимикачів			
35 кВ		110 кВ	
бакових	маломасляних	бакових	маломасляних
16981,2 ±1485	5533,2 ±483,9	53996,4 ±4721,9	12020,4 ±1051,2

Таблиця 8 – Результати розрахунку економії електричної енергії при заміні усіх масляних вимикачів 35–110 кВ на сучасні вакуумні та елегазові та одночасній модернізації системи керування обігрівом

Новий інтервал усереднення температури	Значення економії електричної енергії, кВт·год/рік, при заміні вимикачів та зміні усереднення температури уставки спрацювання для вимикачів			
	35 кВ		110 кВ	
	бакових	маломасляних	бакових	маломасляних
Одна доба	16998,4 ±1492	5550,4 ±490,9	54013,6 ±4728,9	12037,6 ±1058,2
Три години	16997 ±1491,5	5549 ±490,4	54012,2 ±4728,4	12036,2 ±1057,7

З табл. 6 видно, що у випадку заміни уставки увімкнення/вимкнення обігріву масляних вимикачів і їх приводів в АТ «ЧЕРНІГІВОБЛЕНЕРГО» можна

зменшити технологічні витрати електричної енергії приблизно на:

- 9 % – за усереднення температури протягом однієї доби;
- 8,3 % – за усереднення температури протягом трьох годин.

Розрахунки (табл. 7) показують, що заміна усіх масляних вимикачів 35–110 кВ АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО» на сучасні вакуумні та елегазові призведе до зменшення технологічних витрат на обігрів на 98,9 %. Слід не забувати про те, що даний захід буде потребувати значних інвестицій.

З табл. 8 видно, що у разі заміни усіх масляних вимикачів 35–110 кВ АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО» на сучасні вакуумні та елегазові та одночасній модернізації системи керування обігрівом можна зменшити технологічні витрати електричної енергії приблизно на:

- 99,02 % – за усереднення температури протягом однієї доби;
- 99,015 % – за усереднення температури протягом трьох годин.

Слід не забувати про те, що даний захід буде потребувати найбільших інвестицій.

Для оцінки загальної економічної ефективності інвестиційних проектів можна використовувати систему показників, що базуються на врахуванні усіх витрат і вигод від операційної діяльності [14], які повинні враховувати [15]:

- економічний ефект від зменшення технологічних витрат електроенергії;
- величину необхідних інвестицій;
- величину експлуатаційних витрат протягом розрахункового періоду.

Основними із основних показників є інтегральний ефект (або дисконтований грошовий потік –  $NPV$ ), який можна розрахувати за формулою:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_p} \frac{P_t - B_t - K_t}{(1 + E)^t}, \quad (6)$$

де  $P_t$ ,  $B_t$ ,  $K_t$  – поточний річний прибуток, витрати та інвестиції відповідно у  $t$ -му році розрахункового періоду;

$T_p$  – тривалість розрахункового періоду;

$E$  – норма дисконту.

Під час подальших міркувань у якості норми дисконту  $E$  прийнята облікова ставка НБУ у доларах США, яка в даний час дорівнює 1,5 %, тобто  $E = 0,015$ .

Залежності зміни дисконтованого грошового потоку протягом розрахункового періоду у випадку реалізації запропонованих вище заходів по АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО» зображено на рис. 4 та 5.

З рис. 4 видно, що запровадження тільки автоматизованої системи керування обігрівом вимикачів та їх приводів буде потребувати інвестицій близько 27,5 тис. дол. США. Даний захід окупиться протягом перших 3-х років експлуатації та за розрахунковий період 20 років принесе прибуток

близько 215 тис. дол. США. Проте слід не забувати про те, що масляні вимикачі, ресурс яких вже давно вичерпано, не зможуть пропрацювати ще 20 років.

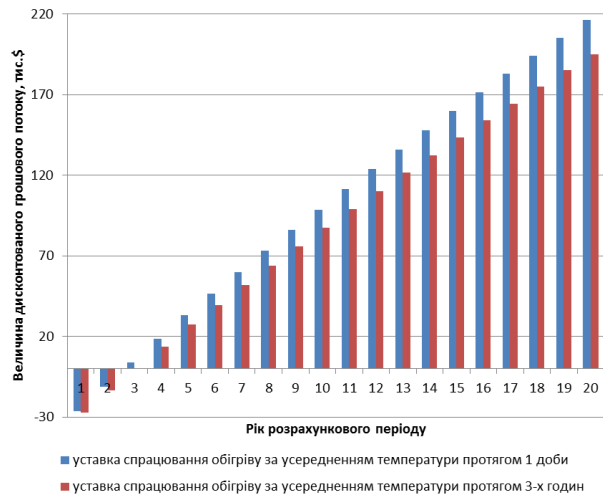


Рисунок 4 – Зміна дисконтованого грошового потоку протягом розрахункового періоду у випадку модернізації системи керування обігрівом вимикачів в АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО»

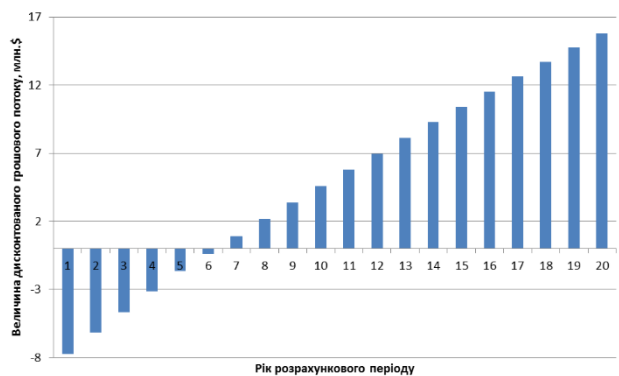


Рисунок 5 – Зміна дисконтованого грошового потоку протягом розрахункового періоду у випадку заміни усіх масляних вимикачів на сучасні вакуумні та елегазові в мережах 35–110 кВ АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО»

З рис. 5 видно, що заміна усіх застарілих масляних вимикачів 35–110 кВ на сучасні вакуумні та елегазові буде потребувати інвестицій близько 7,8 млн. дол. США. Даний захід окупиться протягом перших 6,5 років експлуатації та за розрахунковий період 20 років принесе прибуток близько 15,8 млн. дол. США. Це вказує на достатньо високу ефективність даного заходу. Розтягування у часі інвестицій у заміну вимикачів призведе до зменшення ефективності даного заходу через великі технологічні витрати на підігрів масляних вимикачів, що будуть знаходитися в експлуатації.

Аналогічно було проаналізований захід із одночасної модернізації системи керування обігрівом та заміни усіх масляних вимикачів 35–110 кВ в цілому по АТ «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО». Розрахунки показують, що даний захід буде дорожчий приблизно

на 40 тис. дол. США, ніж попередній. Його термін окупності також буде становити біля 6,5 років.

З вищезазначеного випливає, що модернізація системи керування обігрівом вимикачів 35–110 кВ та їх заміна на сучасні є достатньо ефективними заходами, які у випадку їх запровадження в мережах оператора системи розподілу АТ «ЧЕРНІГІВ ОБЛЕНЕРГО» суттєво зменшать технологічні витрати електричної енергії на обігрів.

**Висновки.** Проведений аналіз типів вимикачів, що знаходяться в експлуатації в електричних мережах 35–110 кВ АТ «ЧЕРНІГІВ ОБЛЕНЕРГО» та встановлено, що від загальної кількості вимикачів відповідного класу напруги 81,1 % (98,0 %) є масляними в мережах 35 кВ (110 кВ). Такі вимикачі потребують значних затрат на обігрів у зимовий період.

Виконана оцінка кількості годин роботи обігріву вимикачів протягом року за різною уставкою та тривалістю усереднення температури. Виходячи з цього розраховано річну кількість електричної енергії, яка витрачається на обігрів масляних вимикачів та їх приводів, що може сягати 0,27–0,35% від загального обсягу електроенергії, що надходить до електричних мереж оператора системи розподілу.

Для зменшення технологічних витрат електроенергії запропоновано оптимізувати системи керування обігрівом вимикачів та виконати їх заміну на сучасні вакуумні та елегазові.

Заміна усіх масляних вимикачів 35–110 кВ АТ «ЧЕРНІГІВ ОБЛЕНЕРГО» на сучасні вакуумні та елегазові приведе до зменшення технологічних витрат на обігрів на 98,9%, проте даний захід буде потребувати значних інвестицій.

Запровадження автоматизованої системи керування обігрівом вимикачів та їх приводів окупиться протягом перших 3-х років експлуатації та за розрахунковий період 20 років принесе прибуток близько 215 тис. дол. США.

Заміна усіх застарілих масляних вимикачів 35–110 кВ на сучасні вакуумні та елегазові окупиться протягом перших 6,5 років експлуатації та за розрахунковий період 20 років принесе прибуток близько 15,8 млн. дол. США.

### Список літератури

1. *Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.* URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06> (дата звернення: 10.05.2021).
2. *СОУ МВБ ЕЕ 40.1-00100227-01:2016. Побудова та експлуатація електричних мереж. Технічна політика. Частина 2. Технічна політика у сфері побудови та експлуатації розподільних електричних мереж.* Київ: Міненерговугілля України, 2016. 71 с.
3. *СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-96:2014. Методичні рекомендації з аналізу технологічних витрат електричної енергії та вибору заходів щодо їх зниження.* Київ: ГРІФРЕ, 2014. 83 с.
4. Зорин В. В., Буйний Р. А., Перепечень В. А. Модели и методы расчета и оценки потерь мощности и электрической энергии в распределительных сетях 0,38 кВ. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.* 2015. № 5 (136). С. 19–27.
5. Буйний Р. О., Красножан А. В., Зорин В. В., Квицинський А. О. Обґрунтування області використання класу напруги 20 кВ у міських електричних мережах України. *Технічна електродинаміка.* 2019. № 1. С. 68–71. doi: 10.15407/techned2019.01.068

6. Безручко В. М., Буйний Р. О., Зорин В. В., Квицинський А. О. Економічно обґрунтована густина струму для кабелів напругою 10-35 кВ, що з'єднують потужні вітроенергетичні установки. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України.* 2020. № 57. С. 5–9. doi: 10.15407/publishing2020.57.005
7. Kassem H. E., Badr M., Ahmed S. A. Reduction of energy losses in electrical distribution systems. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013).* 2013. P. 1–4. doi: 10.1049/cp.2013.0589
8. He D.-s., Lin W., Liang Z.-q. The Energy efficiency diagnosis research of regional power grid loss reduction. *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED).* 2014. P. 241–244. doi: 10.1109/CICED.2014.6991703
9. Bosisio A., Berizzi A., Amaldi E., Bovo C., Sun X. A. Optimal Feeder Routing in Urban Distribution Networks Planning with Layout Constraints and Losses. *Modern Power Systems and Clean Energy.* 2020. Vol. 8, no. 5. P. 1005–1014. doi: 10.35833/MPCE.2019.000601
10. Enemuoh F. O., Alumona T. L., Aliche C. H. Investigation of energy loss in a transmission substation using Onitsha 330/132kV as a case study. *International Journal of Technical Research and Applications.* 2016. Vol. 4, Iss. 4. P. 36–40.
11. Буславець О. А. Інформаційне забезпечення для ефективного планування заходів зі зменшення втрат електроенергії у розподільних електричних мережах. *Наукові праці ДонНТУ: Електротехніка і енергетика.* 2015. № 1 (17). С. 104–110.
12. Архів погоди в м. Чернігів за 2014–2019 роки. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=33135> (дата звернення: 10.05.2021).
13. *Coefficient of Determination. The Concise Encyclopedia of Statistics.* New York: Springer, 2008. doi: 10.1007/978-0-387-32833-1\_62
14. Верба В. А., Гребешкова О. М., Востряков О. В. *Проектний аналіз.* Київ: КНЕУ, 2002. 297с.
15. Chun-Lien S., Teng J. Outage costs quantification for benefit–cost analysis of distribution automation systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2007. Vol. 29, Iss. 10. P. 767–774. doi: 10.1016/j.ijepes.2007.06.026

### References (transliterated)

1. *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii elektroustanovok spozhyvachiv* [Rules of technical operation of electrical installations of consumers]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06> (accessed 10.05.2021).
2. *SOU MEV EE 40.1-00100227-01:2016. Pobudova ta ekspluatatsiia elektrychnykh merezh. Tekhnichna polityka. Chastyna 2. Tekhnichna polityka u sferi pobudovy ta ekspluatatsii rozpodilnykh elektrychnykh merezh* [Company Standard 40.1-00100227-01:2016. Construction and operation of electrical networks. Technical policy. Part 2. Technical policy in the field of construction and operation of power electrical distribution networks]. Kyiv, Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine Publ., 2016. 71 p.
3. *SOU-N EE 40.1-00100227-96:2014. Metodichni rekomendatsii z analizu tekhnolohichnykh vytrat elektrychnoi enerhii ta vyboru zakhodiv shchodo yikh znyzhennia* [Company Standard 40.1-00100227-96:2014. Methodical recommendations for the analysis of technological costs of electricity and the choice of measures to reduce them]. Kyiv, GRIFRE Publ., 2014. 83 p.
4. Zorin V., Buinyi R., Perepечenyi V. Modeli i metodyi rascheta i otsenki poter moschnosti i elektricheskoy enerhii v raspredelitelnykh setyakh 0,38kV [Models and methods for calculating and estimating power and electricity losses in 0.38 kV distribution networks]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit.* 2015, no. 5, pp. 19–27.
5. Buinyi R., Krasnozhan A., Zorin V., Kvytsynskyi A. Obhruntuvannia oblasti vykorystannia klasu napruhu 20 kV u miskykh elektrychnykh merezhakh Ukrainy [Justification for use of voltage class 20 kV in urban electrical networks]. *Technical Electrodynamics.* 2019, no. 1, pp. 68–71. doi: 10.15407/techned2019.01.068
6. Bezruchko V., Buinyi R., Zorin V., Kvytsynskyi A. Ekonomichno obgruntovana hustyna strumu dlia kabeliv napruhoiu 10-35kV, shcho ziednuuiut potuzhni vitroenerhetychni ustanovky [Economically justified current density for 10-35 kV cables, which connect powerful wind generators]. *The proceedings of the institute of electrodynamics of the national academy of sciences of Ukraine.* 2020, no. 1, pp. 68–72. doi: 10.15407/publishing2020.57.005
7. Kassem H. E., Badr M., Ahmed S. A. Reduction of energy losses in electrical distribution systems. *22nd International Conference and*

- Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. 2013, pp. 1–4. doi: 10.1049/cp.2013.0589
8. He D.-s., Lin W., Liang Z.-q. The Energy efficiency diagnosis research of regional power grid loss reduction. *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. 2014, pp. 241–244. doi: 10.1109/CICED.2014.6991703
  9. Bosisio A., Berizzi A., Amaldi E., Bovo C., Sun X. A. Optimal Feeder Routing in Urban Distribution Networks Planning with Layout Constraints and Losses. *Modern Power Systems and Clean Energy*. 2020, vol. 8, no. 5, pp. 1005–1014. doi: 10.35833/MPCE.2019.000601
  10. Enemuoh F. O., Alumona T. L., Aliche C. H. Investigation of energy loss in a transmission substation using Onitsha 330/132kV as a case study. *International Journal of Technical Research and Applications*. 2016, vol. 4, iss. 4, pp. 36–40.
  11. Buslavets O. Informatsiine zabezpechennia dlia efektyvnoho planuvannia zakhodiv zi zmenshennia vtrat elektroenerhii u rozpodilnykh elektrichnykh merezhakh [Information support for effective planning of measures to reduce electricity losses in electricity distribution networks]. *Naukovi pratsi DonNTU: Elektrotehnika i enerhetyka*. 2015, no. 1 (17), pp. 104–110.
  12. *Arkhiv pohody v m. Chernihiv za 2014-2019 roky* [Weather archive in Chernihiv for 2014-2019]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=33135> (accessed 10.05.2021).
  13. *Coefficient of Determination. The Concise Encyclopedia of Statistics*. New York, Springer, 2008. doi: 10.1007/978-0-387-32833-1\_62
  14. Verba V., Grebeshkova O., Vostryakov O. *Proektnyi analiz* [Project analysis]. Kyiv, KNEU Publ., 2002. 297 p.
  15. Chun-Lien S., Teng J. Outage costs quantification for benefit–cost analysis of distribution automation systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2007, vol. 29, iss. 10, pp. 767–774. doi: 10.1016/j.ijepes.2007.06.026

Надійшла (received) 15.05.2021

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Коленченко Євген Юрійович (Коленченко Евгений Юрьевич, Kolenchenko Yevhen)** – інженер відділу перспективного розвитку АТ «Чернігівобленерго»; м. Чернігів, Україна; e-mail: yevhen.kolenchenko@gmail.com.

**Безручко Вячеслав Михайлович (Безручко Вячеслав Михайлович, Bezruchko Viacheslav)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Чернігівська політехніка»; м. Чернігів, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3705-8543>; e-mail: slavajm@meta.ua.

**Буйний Роман Олександрович (Буйный Роман Александрович, Buinyi Roman)** – кандидат технічних наук доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Чернігівська політехніка»; м. Чернігів, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5432-2924>; e-mail: buinyiroman@gmail.com.

**Діхтярук Ігор Віталійович (Дихтярук Игорь Витальевич, Dihtyaruk Igor)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Чернігівська політехніка»; м. Чернігів, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6565-6356>; e-mail: dihtyaruk.igor@gmail.com.