

УДК 621.313(075.8)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДХИЛЕНЬ НАПРУГИ В МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Дмитро Гречин, к. т. н., Іван Дробот

Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: hrechynd@ukr.net, dim39.2017@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.061>

Гречин Д., Дробот І. Дослідження відхилень напруги в мережі електропостачання підприємства при експлуатації електрообладнання

У праці визначено проблему рівня напруги у споживачів та допустимі межі зміни напруги. Відхилення рівня напруги від номінального значення має негативний вплив на споживачів електроенергії: електроосвітлення, електродвигуни, електротехнологічні установки та ін. Одна з основних причин зниження напруги у споживачів – це втрати напруги в мережі електропостачання. Аналіз публікацій показав актуальність проведення досліджень електричних мереж для забезпечення кращих техніко-економічних показників. Сучасні дослідження проводяться за допомогою моделювання. Завданням дослідження є побудова структурно-математичної моделі системи електропостачання підприємства в середовищі MATLAB/Simulink та аналіз спадів напруг у мережі. Мета роботи – за допомогою побудованої моделі дослідити спади напруг у мережі. У роботі побудовано структурно-математичну модель мережі електропостачання підприємства. Проведено дослідження роботи лінії 10 кВ на спад напруги у лінії. Проведено дослідження роботи трьох кабельних ліній 0,4 кВ по чергово на спад напруги. У лінії КЛ2 спад напруги перевищував 5 %, у цій лінії збільшили переріз і знов провели дослід – спад напруги був меншим за 5 %. Проведено дослід одночасної роботи трьох фідерів із номінальним навантаженням. Аналіз показав, що, як у попередніх дослідах, втрати напруги були в межах допустимих втрат, а в лінії КЛ2, як і зазначалося раніше, втрати перевищували допустимі, але зміна перерізу кабелю вирішує цю проблему.

Спочатку проведено аналіз щодо лінії КЛ1. Цю лінію ми досліджували при номінальному режимі від 0 до 1,2 S_H . Втрати напруги в цій лінії були в межах допустимих втрат, а саме 274,5 В. Згодом було проведено спостереження спадів напруги і на лінії КЛ2. Аналіз щодо цієї лінії також здійснено при номінальному режимі від 0 до 1,2 S_H . У підсумку відхилення напруги було більше, ніж допустимі норми. Щоб це усунути, було вибрано кабель з більшими перерізом, відхилення напруги було в допустимих межах – від -5 % до +5 %. Досліди лінії КЛ3 показали, що втрати напруги були в допустимих межах втрати, а саме – 5 %. Лінія також працювала при номінальному режимі. У лінії КЛ4 втрати напруги були дуже малі, спостереження лінії також було здійснено при номінальному режимі від 0 до 1,2 S_H . При п'ятому досліді до кабельних ліній КЛ2 – КЛ4 було підключено одночасно все навантаження. Аналіз показав, що в лініях КЛ3 і КЛ4 втрати напруги були в межах допустимих втрат, а в лінії КЛ2, як і зазначалося раніше, втрати перевищували допустимі, але зміна перерізу кабелю вирішує цю проблему.

Ключові слова: електропостачання, спад напруги, напруга, модель.

Hrechyn D., Drobot I. Investigating voltage deviations in the enterprise's power supply network during the electrical equipment operation

The article focuses on the issue of voltage levels at consumers' buildings and the acceptable limits of voltage fluctuations. Any deviation from the nominal voltage can negatively affect the electricity supply for consumers, including lighting, electrical engines, and other electrotechnical equipment. One of the primary reasons for voltage drop is the loss of voltage in the power supply network. Research has shown that analyzing power supply networks is crucial to ensure better technical and economic performance. Nowadays, research is conducted through modeling, and the main goal is to build a structural-mathematical model of the power supply system of the enterprise using MATLAB/Simulink and analyze voltage drops in the network. The purpose of this work is to investigate voltage drops in the network using the constructed model. In this work, the authors built a structural-mathematical model of the power supply network of the enterprise. The researchers conducted a study of the 10kV line's operation on voltage drops in the line and also studied three 0.4kV cable lines alternately for voltage drops. The KL2 line had a voltage drop of more than 5%, so the cross-section was increased and the experiment was conducted again. This time, the voltage drop was less than 5%. The authors of the study also experimented with the simultaneous operation of three feeders with nominal loads. The analysis showed that, as in previous experiments, the voltage loss was within the allowable losses, and in the KL2 line, the losses exceeded the allowable ones, but changing the cable cross-section solved this problem.

First, the authors analyzed the KL1 line, studying it at nominal mode from 0 to 1.2Sn. It was found that the voltage losses in this line were within the limits of permissible losses, specifically 274.5 V. Subsequently, voltage drops on the KL2 line, which were also analyzed at the nominal mode from 0 to 1.2 Sn, were observed. The voltage deviation exceeded the permissible norms, so a cable with a larger section was selected, and the voltage deviation was within the permissible limits from -5% to +5%. The researchers then tested the KL3 line and found that the voltage losses were within the allowable loss

limits, particularly 5%. The line also operated at the nominal mode. In the KL4 line, the voltage losses were minimal, and the line at the nominal mode from 0 to 1.2 Sn was monitored. In the fifth experiment, the entire load was connected to the KL2 - KL4 cable lines at the same time. The analysis showed that the voltage losses in the KL3 and KL4 lines were within the permissible limits, and in the KL2 line, as mentioned earlier, the losses exceeded the permissible ones, but changing the cable cross-section solved this problem.

Key words: power supply, voltage drop, voltage, model.

Постановка проблеми. Якість електричної енергії – це ступінь відповідності фактичних значень параметрів електричної енергії встановленим ГОСТ 13109 – 97 значенням. У наших дослідженнях йдеться про відхилення напруги, відповідно до ГОСТ 13109 – 97 нормальне значення щодо відхилення напруги це +5 або -5 %, граничне значення – це вже коли +10 або -10 %. Коливання напруги в мережі залежить від потужності джерел живлення, потужності, яка втрачається під час передавання по лініях електропередачі та потужності електроспоживачів. До найбільш розповсюджених споживачів варто віднести асинхронні двигуни, в яких потужність прямо пропорційна квадрату напруги, а отже, втрати удвічі більші. Отже, при малій втраті напруги у двигунах втрати потужності будуть серйозніші. При незначній втраті напруги також зменшується швидкість обертання двигуна, а в підсумку збільшується ковзання. Також підвищується струм, падає коефіцієнт корисної дії і швидше зношується ізоляція. При втраті напруги погіршуються пусковий момент і механічні характеристики двигунів.

В електротехнологічних пристроях втрати напруги призводять до зниження потужності, яка надходить із мережі, збільшуються затрати часу технологічних і виробничих процесів, а відповідно й якість продукції стає гіршою. При втратах напруги погіршується також і освітленість, оскільки світловий потік залежить від значення напруги. У разі збільшення напруги коефіцієнт корисної дії ламп збільшується, а термін їх служби, навпаки, стає меншим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження процесів, які відбуваються в електричних мережах, не втрачають своєї актуальності [1–19]. Сучасні методи дослідження передбачають використання математичного апарату та сучасного програмного забезпечення [1–19].

Регулювання напруги передбачається в мережах живлення і розподільчих мережах та проводиться незалежно. Однак основне завдання в регулюванні напруги зовсім інше, а саме: у мережах живлення необхідно знизити втрати електроенергії, а в розподільчих мережах потрібно підтримати нормовані значення щодо відхилення напруги на затискачах електричних приймачів. Розрізняють централізоване і місцеве регулювання напруги. У першому випадку регулювання напруги здійснюється в центрах живлення і змі-

нює напругу у всій мережі, а в другому випадку регулювання здійснюється безпосередньо споживачем і значення напруги змінюється лише в локальній частині мережі.

За допомогою спеціальних пристроїв, а також різних заходів можливо регулювати значення напруги в мережі. Основні способи регулювання напруги – це регулювання коефіцієнта трансформації; зміна параметрів мережі; зміна струму збудження; зміна реактивної потужності.

Постановка завдання. Завданням дослідження є побудова структурно-математичної моделі системи електропостачання підприємства в середовищі MATLAB/Simulink та аналіз спадів напруг у мережі. Мета роботи – за допомогою побудованої моделі дослідити спади напруг у мережі.

Виклад основного матеріалу. Як джерело живлення для забезпечення електроенергією підприємства використовується районна підстанція, яка розташована на відстані 15 км від підприємства. Більшість електрообладнання на підприємстві живиться від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В і частотою 50 Гц. Схема електропостачання зображена на рис. 1.

Параметри кабельних ліній наведено у табл. 1.

На рис. 2 зображена модель мережі електропостачання підприємства, на основі якої й будуть проводитися досліди. Для кожної лінії електропостачання, врахувавши вибрані кабелі, вказуємо в блоках середовища MATLAB/Simulink відповідні параметри.

Аналіз результатів вимірювань показав, що при збільшенні споживаної потужності на підприємстві відповідно збільшуються і втрати напруги. Взнявши до уваги всі лінії електропередачі, були проведені експерименти з дослідження втрат напруги в лініях. Аналіз виконаних спостережень вказано в табл. 2. Для дослідження відхилення напруги і її впливу на обладнання системи електропостачання було використано дані про системи зовнішнього та внутрішнього живлення підприємства, сумарну потужність навантаження, склад, а також структуру приймачів та сумарні навантаження приймачів, де U_1 – напруга на початку лінії, В; U_2 – напруга в кінці лінії, В; ΔU_1 – спад напруги в лінії, В.

При дослідженні лінії КЛ2 0,4 кВ виявили, що втрати напруги не були в межах від -5 % до +5 %. Тому ми вибрали кабель із більшим перерізом.

Внаслідок цього втрати напруги були зменшені і перебували в допустимих межах.

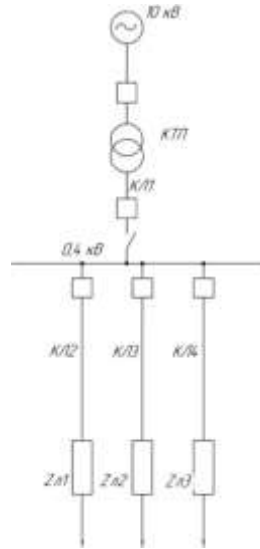


Рис. 1. Схема електропостачання підприємства
Fig. 1. Power supply scheme of the enterprise

Таблиця 1. Параметри кабельних ліній
Table 1. Parameters of cable lines

Лінія	P, кВт	S _н , кВА	S _{ном} , мм ²	L, км	Паспортні дані		Згідно довжини лінії	
					r _c , Ом/км	x _c , Ом/км	r _c , Ом/км	x _c , Ом/км
K/1	203,6	235,9	89,8	15	0,258	0,081	3,87	1,21
K/2	101,8	119,9	54,05	0,25	0,268	0,098	0,067	0,024
K/3	78,4	102,2	70,6	0,45	0,268	0,098	0,120	0,044
K/4	23,4	77,7	34,2	0,35	0,868	0,109	0,303	0,028

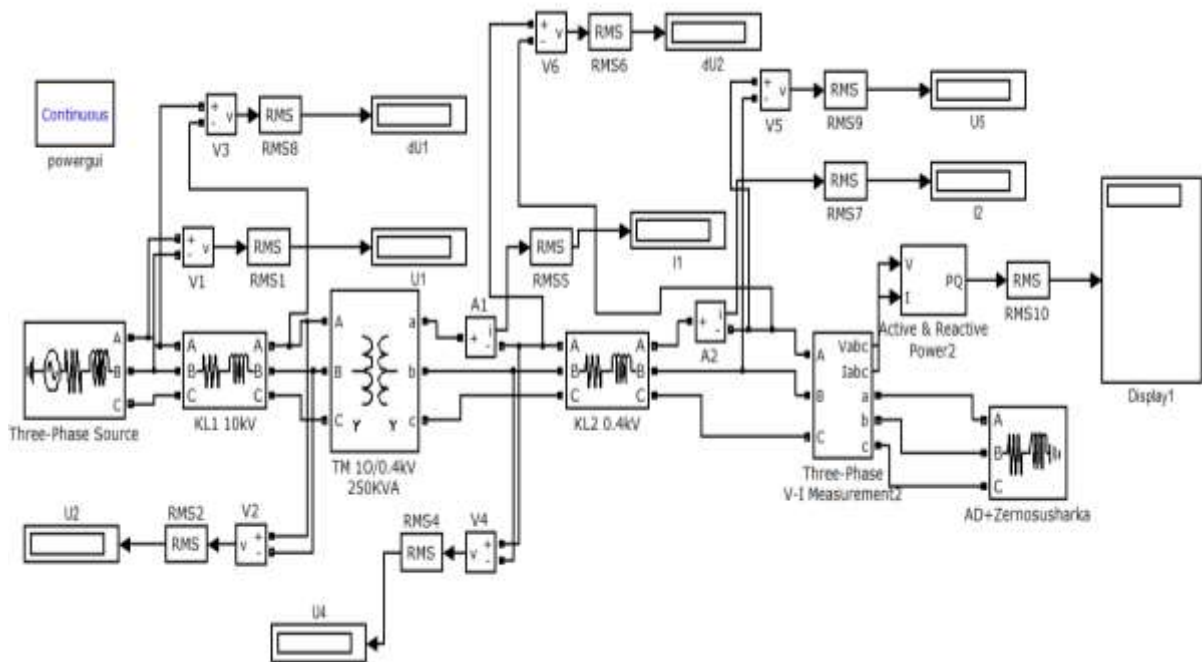


Рис. 2. Модель дослідження Line 1 (10 кВ) і Line 2 (0,4 кВ)
Fig. 2. Study model of Line 1 (10 kV) and Line 2 (0.4 kV)

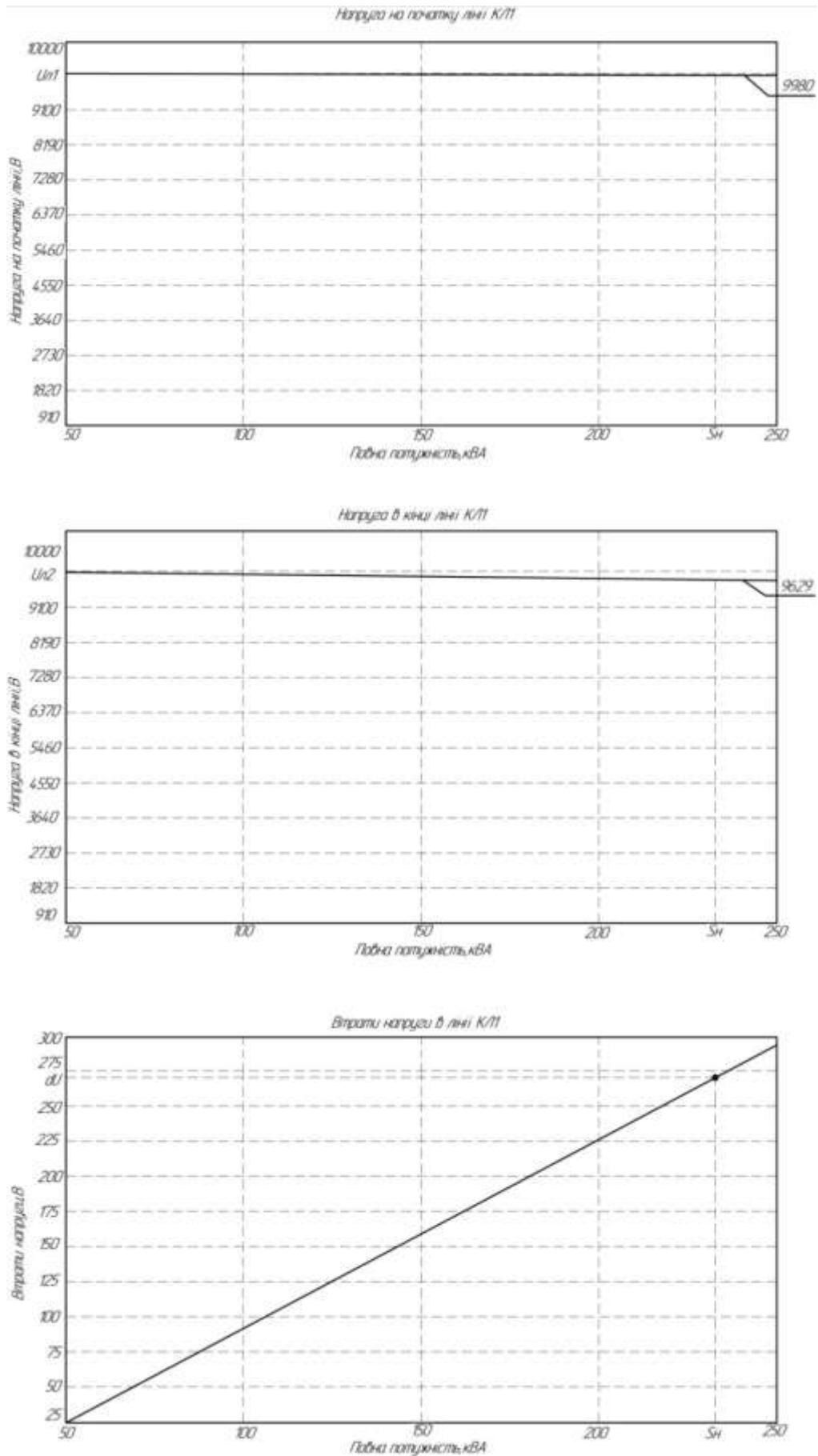


Рис. 3. Напряга в лінії КЛ1 (10 кВ)
Fig. 3. Voltage in the KL1 (10 kV) line

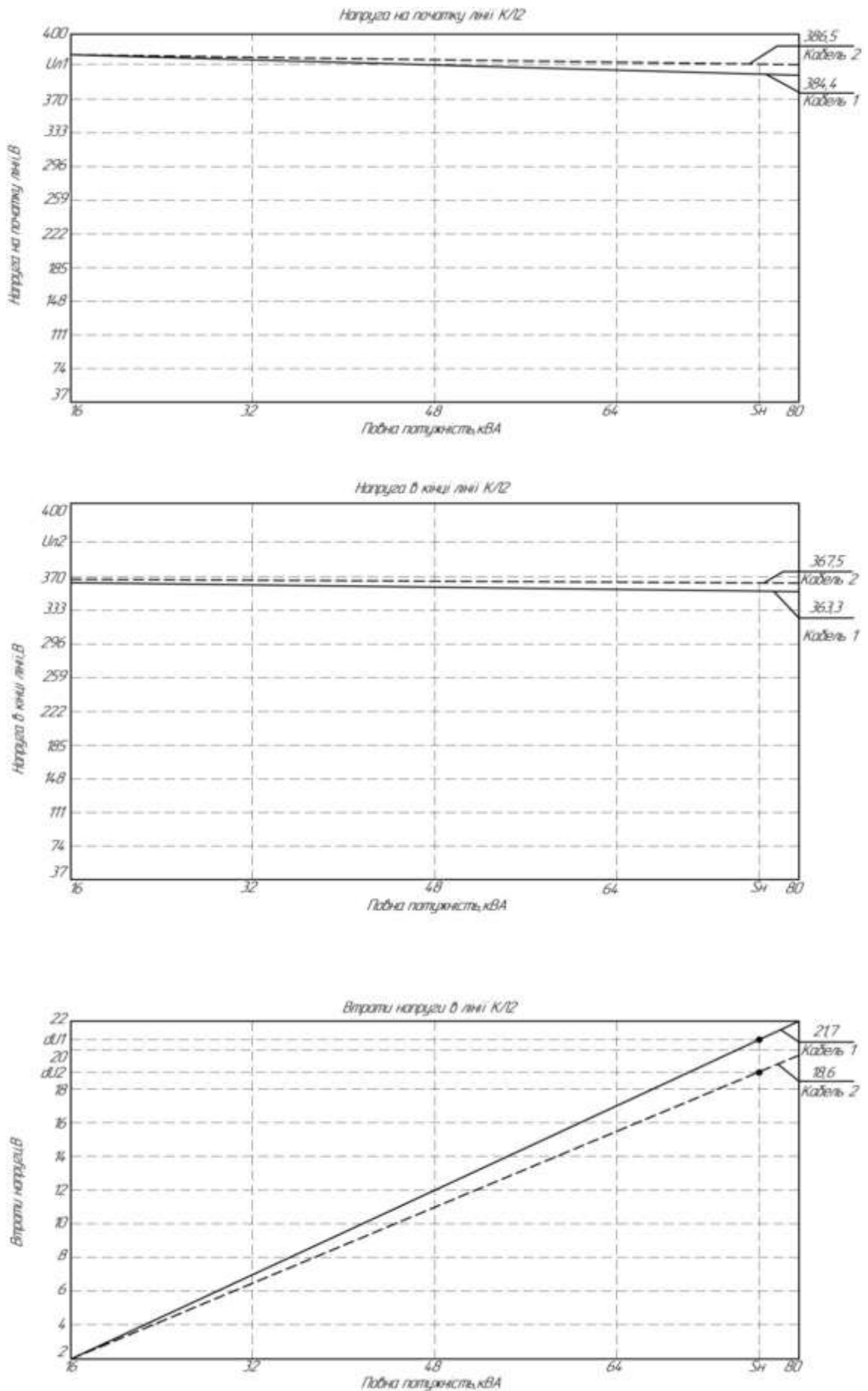


Рис. 4. Напряга в другій лінії КЛ2 (0,4 кВ)
 Fig. 4. Voltage in the second KL2 (0.4 kV) line

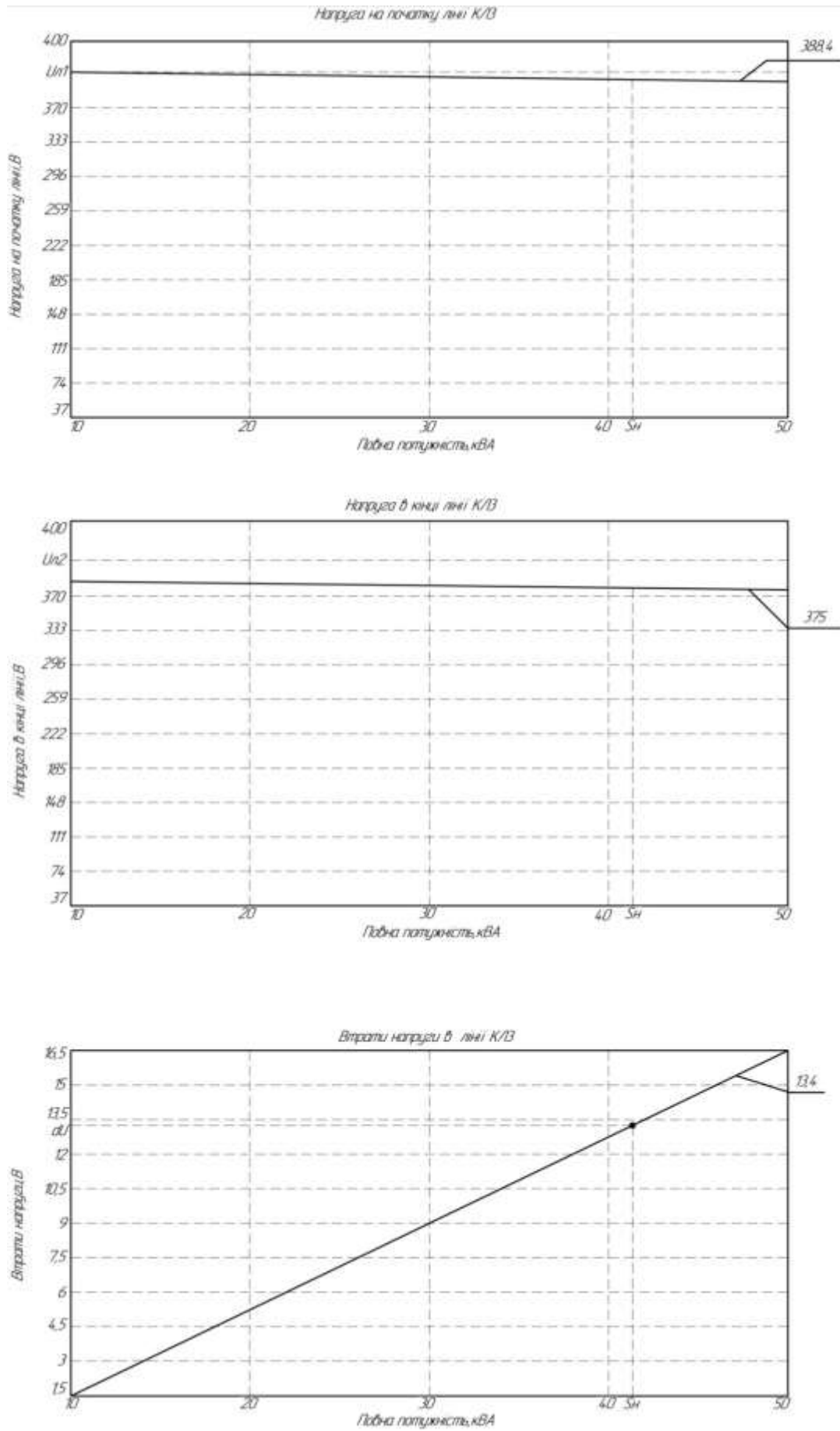


Рис. 5. Напруга в лінії КЛЗ (0,4 кВ)
Fig. 5. Voltage in the KL3 (0.4 kV) line

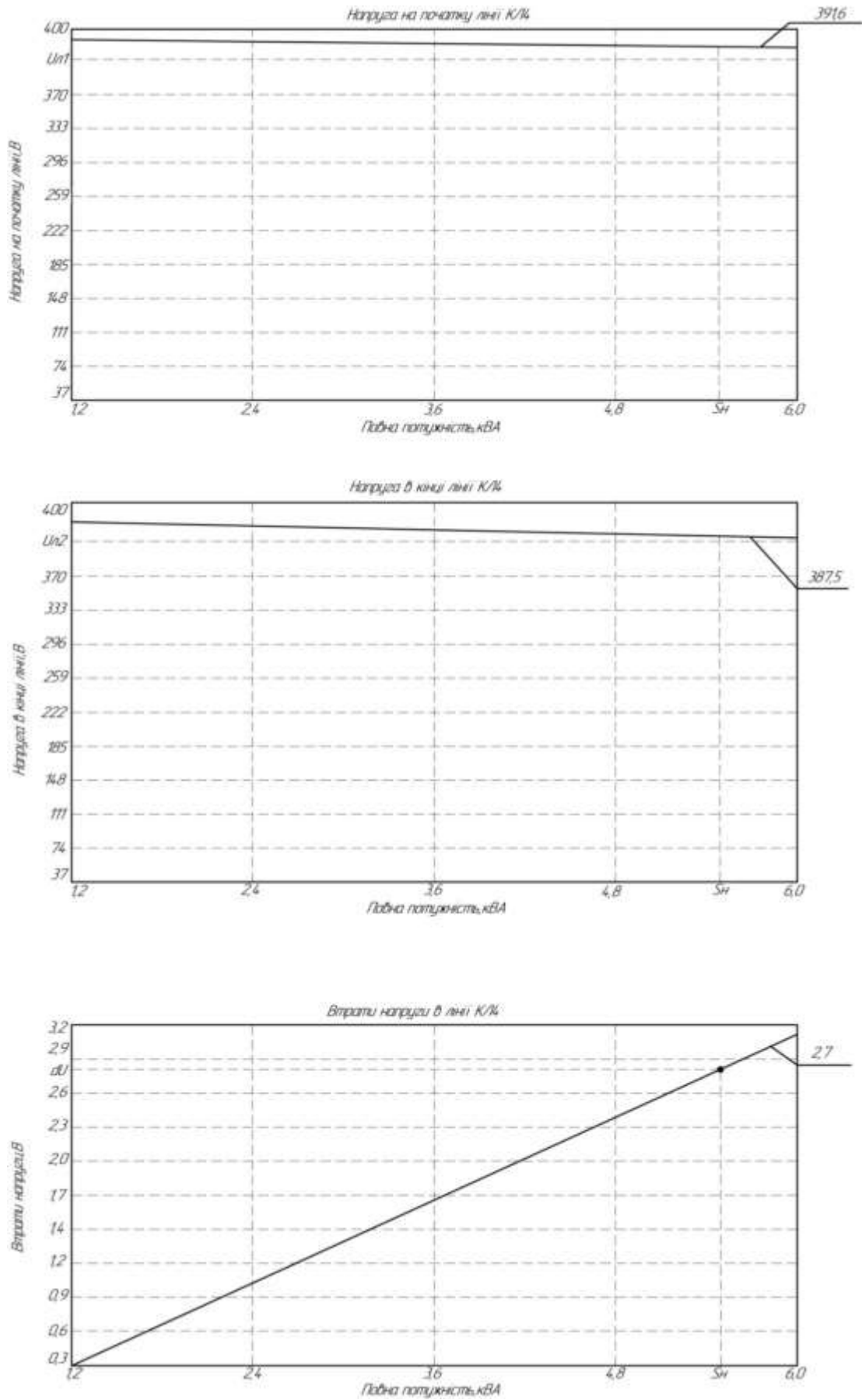


Рис. 6. Напруга в лінії КЛ4 (0,4 кВ)
Fig. 6. Voltage in the KL4 (0.4 kV) line

Внаслідок досліджень було показано певні спади напруги на лініях електропостачання. Для того щоб електроприймачі на підприємстві працювали нормально, потрібно, щоб спад напруги був у межах допустимих норм. Спади напруг, які були визначені внаслідок аналізу ліній 0,4 кВ, будуть небезпечні для робочого освітлення, оскільки освітлення на підприємстві виконане люмінесцентними лампами, при втраті напруги більше ніж на 5 % термін придатності ламп ско-

рочується на 5–10 %. Також зміна напруги в межах, більших від -5 % до +5 %, погано впливає на асинхронні двигуни, оскільки зменшується продуктивність технологічного обладнання. При зниженні напруги на 1 % споживання реактивної потужності збільшується на 5 %. Знижується момент опору робочих механізмів з вентиляторною характеристикою, оскільки зменшується швидкість обертання. Графіки залежностей проведених дослідів вказані на рис. 3-6.

Таблиця 2. Результати проведених спостережень

Table 2. Results of the observations

Лінія	U_1	U_2	ΔU_1
К/11	9980	9629	274,5
К/12 кабель 1	364,4	363,3	21,7
К/12 кабель 2	366,5	367,5	18,6
К/13	388,4	375	13,4
К/14	3916	387,5	2,7

Модель дослідження при одночасних максимальних навантаженнях на лініях вказана на рис. 7.

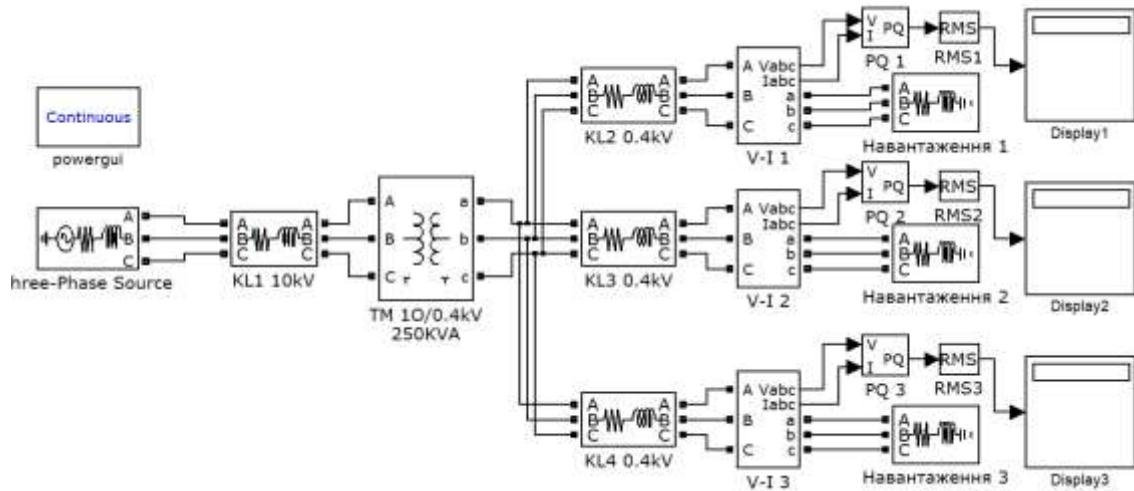


Рис. 7. Модель дослідження спадів напруг при одночасному максимальному навантаженні на лінії
Fig. 7. Model of the study of voltage drops at the simultaneous maximum load on the line

Сумарні втрати напруги в кожній лінії 0,4 кВ визначаються при параметрі максимального навантаження відповідно в кожній із цих трьох ліній. Дані цих дослідів зображено в табл. 3.

Таблиця 3. Сумарні втрати напруги в лініях КЛ2 – КЛ4 (0,4 кВ)

Table 3. Total voltage losses in the KL2 - KL4 (0.4 kV) lines

Лінія	U_1, B	U_2, B	$\Delta U, B$	$\Delta U, \%$
К/11	9968	9629	339	3,4
К/12 кабель 1	378,9	354,4	24,2	8,3
К/12 кабель 2	378,9	359,2	19,7	4,8
К/13	378,9	360,7	18,2	4,5
К/14	378,9	363,6	15,3	3,8

Висновки. Спочатку проведено аналіз щодо лінії КЛ1. Цю лінію ми досліджували за номінального режиму від 0 до 1,2 S_H . Втрати напруги в цій лінії були в межах допустимих втрат, а саме 274,5 В. Згодом було проведено спостереження спадів напруги і на лінії КЛ2. Аналіз щодо цієї лінії також здійснено при номі-

нальному режимі від 0 до 1,2 S_H . У підсумку відхилення напруги було більше, ніж допустимі норми. Щоб це усунути, було вибрано кабель з більшими перерізом, відхилення напруги було в допустимих межах від -5 % до +5 %. Досліди лінії КЛ3 показали, що втрати напруги були в допустимих межах втрат, а саме 5 %.

Лінія також працювала при номінальному режимі. У лінії КЛ4 втрати напруги були дуже малі, спостереження лінії також було здійснено при номінальному режимі від 0 до $1,2 S_H$. При п'ятому досліді до кабельних ліній КЛ2 – КЛ4 було підключено одночасно все навантаження. Аналіз показав, що в лініях КЛ3 і КЛ4 втрати напруги були в межах допустимих втрат, а в лінії КЛ2, як і зазначалося раніше, втрати перевищували допустимі, але зміна перерізу кабелю вирішує цю проблему.

Бібліографічний список

1. Анализ электромагнитных процессов и эквивалентных параметров сегментированных токопроводящих жил силовых кабелей на напряжение 330 кВ / А. К. Шидловский, А. А. Щерба, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая, В. М. Золотарев. *Техн. электродинамика*. 2008. № 6. С. 7–13.
2. Воротницкий В. Э., Загорский Я. Т., Апрыткин В. Н. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. *Электрические станции*. 2000. 154 с.
3. Галанов В. П., Галанов В. В. Влияние качества электроэнергии на уровень ее потерь в сетях. *Электрические станции*. 2001. 63 с.
4. Гоголюк О. П. Дослідження електропередачі в сучасних комп'ютерних середовищах. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 671. С. 24-31.
5. Евдокунин Г. А. Электрические системы и сети. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербург. гос. политех. ун-та, 2011. 286 с.
6. Золотарев М. В., Обозный А. Л. Новые отечественные разработки в области силовых кабелей. *Вісник НТУ ХПИ*. 2006. Вип. 34. С. 129–132.
7. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины / В. В. Лях, В. М. Молчанов, И. В. Судакова, И. В. Павличенко. *Электрические сети и системы*. 2009. № 3. С. 16–21.
8. Левонюк В. Порівняльний аналіз математичних моделей перехідних електромагнітних процесів в елементах електроенергетичних систем. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 155-161.
9. Математическая модель электрической напряженности изолированных жил силовых кабелей / В. В. Золотарев, В. П. Карпушенко, А. А. Науменко, С. В. Бузько. *Физические и компьютерные технологии*: тр. 12 МНТК. Харьков: ХНПК «ФЭД», 2006. С. 239–240.
10. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу / А. В. Чабан, В. Р. Левонюк, І. М. Дробот, А. Ф. Герман. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 3. С. 30–35.
11. Нестеров Р. Е., Канев Ф. Ю., Макенова Н. А. Математическое моделирование линий электропередач и систем заземления. *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1.1. С. 15-21.
12. Основи електропостачання агропромислового комплексу: навч. посіб. / Б. В. Дурняк, В. О. Чумакевич, І. М. Лях, А. М. Яцун. Львів: Укр. акад. друкарства, 2017. 544 с.
13. Рагозин А. А. Моделирование электроэнергетических систем при решении задач несимметричных режимов. Повышение эффективности работы энергосистем. Москва: Энергоатомиздат, 2001. С. 51.
14. Соколова Е. М. Электрическое и электро-механическое оборудование. Москва: Мастерство, 2001. 224 с.
15. Чабан А., Левонюк В. Аналіз неусталених електромагнітних процесів у фрагменті електроенергетичної системи на основі класичних підходів до моделювання. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2017. № 21. С. 167-177.
16. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 288 с.
17. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств: підручник. Вінниця: Нова кн., 2004. 656 с.
18. Щерба А. А., Лободзинский В. Ю. Математическое моделирование электромагнитных процессов в трехфазной кабельной линии электропередачи при разных транспозициях экранов однофазных кабелей. *Технічна електродинаміка*. Тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність. 2011. Ч. 2. С. 271–276.
19. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ. *Техн. электродинамика*. 2013. № 1. С. 9–15.

Стаття надійшла 05.09.2023