

В.П. Калінчик<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4028-0185

О.В. Бориченко<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945

В.В. Калінчик<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-3931-646X

О.В. Мейта<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4132-5202

В.А. Побігайло<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329

<sup>1</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ НАПРУГИ ЯК ЗАСІБ РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ

*В статті обґрунтовано регулювання режимами електроспоживання виробничих об'єктів за рахунок управління режимами напруги в системі електропостачання. Показано, що регулювання електроспоживання за допомогою споживачів - регуляторів (СР) досить часто пов'язане зі збитками, що виникають при відключенні СР. Дослідження показали, що позитивну роль у підвищенні ефективності оптимізації режимів електроспоживання може зіграти і управління режимами напруги в системі електропостачання, що впливає на його рівні. Показано, що доцільне комплексне вирішення проблеми управління електроспоживанням як за рахунок управління СР, так і впливу на режими напруги системи електропостачання. Показано, що регулюючий ефект навантаження характеризується статичними характеристиками. Розв'язання задачі формування статичних характеристик можливе двома способами: через здійснення активних експериментів та на основі інтегрування статичних характеристик окремих споживачів. Для виявлення статичних характеристик навантаження проводились експериментальні дослідження. Експерименти проводились на трансформаторах головної понижуючої підстанції підприємства хімічної промисловості, обладнаних РПН. Побудовані експериментальні статичні характеристики, які мають зміни лінійного характеру. Параметри моделі визначені за методом найменших квадратів. Побудовані експериментальні та аналітичні статичні характеристики. Процедура управління режимами напруги для регулювання навантаження реалізована в системі управління електроспоживанням.*

**Ключові слова:** управління, навантаження, регулювання, напруга, електроспоживання, статичні характеристики.

**Вступ.** В сформованій енергетичній галузі України базові електрогенеруючі потужності суттєво переважають маневрові, які вкрай необхідні для ефективного покриття потреб в електроенергії, особливо в періоди пікового попиту на неї [1].

Дефіцит потужності в години пікових навантажень, екстенсивне використання електроенергії ускладнюють підтримання балансу між потужностями генерації та споживання. Все це привело до необхідності введення обмежень електричного навантаження виробничих споживачів.

Створення маневрових електроенергетичних потужностей вимагає значних коштів і, що не менш важливо, значного часу. Іншим шляхом вирішення цієї задачі є управління електроспоживанням, яке до останнього часу зв'язувалось з регулюванням потужності споживачів-регуляторів (СР) систем електропостачання (СЕ) промислових підприємств. Управління електроспоживанням через регулювання потужності споживачів-регуляторів стало важливим фактором зменшення навантажень промислових об'єктів, направленим на виконання обмежень енергопостачальних компаній.

Управління споживачами-регуляторами (СР) нормального режиму передбачає наявність технологічних заділів, що сприяють забезпеченню безперервного функціонування технологічного процесу під час переведення до позапікового споживання цих СР [1]. Відключення СР або зниження їх потужності проводиться залежно від реального електроспоживання підприємства та обмежень, що накладаються енергосистемою.

Проте регулювання електроспоживання за допомогою СР досить часто пов'язане зі збитками, що виникають при відключенні СР.

Тим часом, як показують дослідження [2-7] позитивну роль у підвищенні ефективності оптимізації режимів електроспоживання може зіграти і управління режимами напруги в системі електропостачання (СЕ), що впливає на його рівні.

В зв'язку з цим доцільне комплексне вирішення проблеми управління електроспоживанням як за рахунок управління СР, так і впливу на режими напруги СЕ.

**Метою роботи** є підвищення ефективності регулювання режимами електроспоживання виробничих об'єктів за рахунок управління режимами напруги в системі електропостачання.

**Викладення основного матеріалу.** В розрахунковій моделі навантаження розподільної мережі задається своїми статичними характеристиками

$$P = F(U, \omega) \quad (1)$$

Вираз (1) часто апроксимується поліномом виду [8]

$$P = 1 - a_p - b_p - c_p + a_p U + b_p U^2 + c_p \omega, \quad (2)$$

коефіцієнти  $a_p, b_p, c_p$  - постійні.

Регулюючий ефект навантаження по напрузі при постійній частоті  $k_{pU}$  досить повно характеризує зміни навантаження при малих відхиленнях напруги. Із визначення регулюючого ефекту випливає, що у виразі (2)

$$a_p + 2b_p = k_{pU}, c_p = k_p. \quad (3)$$

Нехтуючи незначною нелінійністю  $b_p \approx 0$ , статичну характеристику (2) можна представити як

$$P = 1 - k_{pU}(1 - U). \quad (4)$$

Розв'язання задачі формування статичних характеристик можливе двома способами: через здійснення активних експериментів та на основі інтегрування статичних характеристик окремих споживачів. Орієнтація на другий спосіб можлива при обмеженому числі різнотипних електроприймачів. В даній роботі статичні характеристики будемо досліджувати через здійснення експериментів.

Регулювання напруги розподільних мереж можна здійснювати шляхом змінення коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів; ступеня збудження вольтодобавочних уставок; шляхом обмеження перетоків потужності; подовжньою компенсацією.

В залежності від того, на якому рівні мережі використовують технічні засоби регулювання напруги, їх можна віднести:

а) до засобів централізованого регулювання напруги, які дозволяють змінювати рівень напруги на шинах центрів живлення (головні понижуючі підстанції – ГПП, центральні розподільні пункти – ЦРП);

б) до засобів місцевого регулювання напруги, якими забезпечуються розподільні мережі, як правило, промислових підприємств (трансформаторні підстанції – ТП, розподільні пункти – РП).

Для здійснення регулювання в центрах живлення електричних мереж передбачаються технічні засоби на основі змінення коефіцієнта трансформації або генерації реактивної потужності шляхом зустрічного регулювання напруги [9].

Рекомендується [9] пониження напруги на 5 ... 10 %. Ефективним способом досягнення цього є використання засобів регулювання напруги під навантаженням (РПН), якими забезпечуються силові трансформатори. РПН забезпечують регулювання в межах 12 % (8x1,5 %) для напруги 35 кВ та 16 % (9x1,78 %) – для напруги 110 кВ та вище.

Для місцевого регулювання напруги застосовуються: лінійні регулятори; конденсаторні установки; розподільні трансформатори з РПН [9]. Лінійні регулятори використовують для незалежного регулювання напруги для частини споживачів аналогічно як для ЦРП. Ефективність лінійних регуляторів особливо проявляється в мережах великої довжини з дротами малого перетину.

**Експериментальні дослідження статичних характеристик.** Експериментальні дослідження проводились для виявлення статичних характеристик навантаження.

Експерименти проводились на трансформаторах головної понижуючої підстанції (ГПП) підприємства хімічної промисловості, обладнаних РПН.

Результати досліджень для двох трансформаторів (Т1,Т2) ГПП наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1 Експериментальні статичні характеристики - ГПП (Т1)

U, кВ	6,5	6,4	6,3	6,2	6,1	6,0	5,9	5,8	5,7
P, кВт	27230	27150	27110	27060	26890	26840	26800	26750	26690

Таблиця 2 Експериментальні статичні характеристики - ГПП (Т2)

U, кВ	6,5	6,4	6,3	6,2	6,1	6,0	5,9	5,8	5,7
P, кВт	22000	21900	21860	21800	21780	21700	21680	21650	21590

Експериментальні статичні характеристики за даними, наведеними в таблицях 1 і 2, показані на рисунках 1,2.

Відповідно до міждержавного стандарту ГОСТ 13109-97 напруга в мережі може змінюватись в межах від -5 % до + 5 %, тобто від 6,3 кВ до 5,7 кВ. Тоді регулюючий ефект від змінення напруги визначиться:

Для ГПП (Т1),

$$P_1 = 27110 - 26690 = 420(\text{кВт});$$

Для ГПП (Т2),

$$P_2 = 21860 - 21590 = 270(\text{кВт}).$$

Сумарне зменшення навантаження по активній потужності по підприємству може скласти :  
 $P_C = P_1 + P_2 = 420 + 270 = 690$  (кВт).

Аналізуючи рисунки 1, 2 видно, що статичні характеристики мають зміни лінійного характеру.

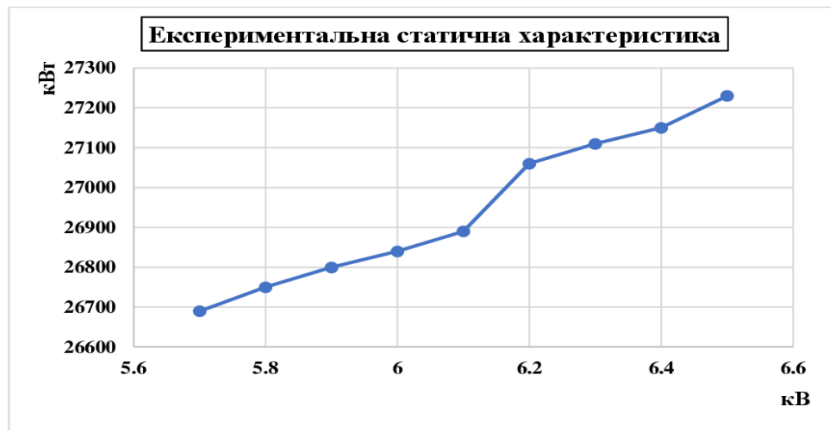


Рисунок 1 - Експериментальна статична характеристика Т1 ГПП

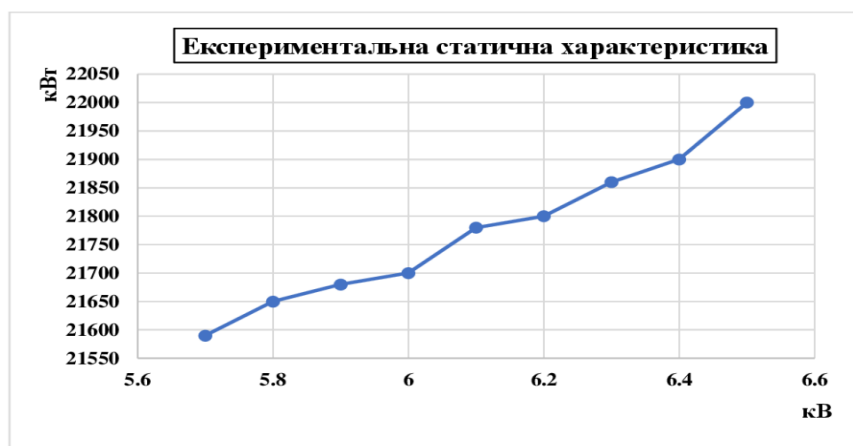


Рисунок 2 - Експериментальна статична характеристика Т2 ГПП

Тобто, статичні характеристики в загальному виді представляються

$$\bar{y}_t = a + bt, \tag{5}$$

де  $\bar{y}_t = \bar{P}_t$  – навантаження,  $t = U_t$  – напруга,  $a$  і  $b$  – параметри моделі.  
 Параметри моделі можуть бути визначені за методом найменших квадратів.  
 Функціонал має вигляд

$$J = \sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2 = \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y}_t)^2 = \sum_{t=1}^n (y_t - a - bt)^2.$$

Для мінімізації  $J$  по  $a$  і  $b$  визначимо часткові похідні  $\frac{\partial J}{\partial a}$  і  $\frac{\partial J}{\partial b}$  і прирівняємо їх до нуля:

$$\frac{\partial J}{\partial a} = 2 \sum_{t=1}^n (y_t - a - bt) = 0,$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = 2 \sum_{t=1}^n (y_t - a - bt)t = 0.$$

Запишемо співвідношення:

$$\sum_{t=1}^n y_t = \sum_{t=1}^n a + \sum_{t=1}^n bt,$$

$$\sum_{t=1}^n y_t t = \sum_{t=1}^n at + \sum_{t=1}^n bt^2.$$

Виносячи за знак суми постійні величини, отримаємо систему лінійних рівнянь:

$$\sum_{t=1}^n y_t = an + b \sum_{t=1}^n t,$$

$$\sum_{t=1}^n y_t t = a \sum_{t=1}^n t + b \sum_{t=1}^n t^2.$$

Після проведення перетворень отримаємо:

$$a = \frac{\sum_{t=1}^n y_t \sum_{t=1}^n t^2 - \sum_{t=1}^n t \sum_{t=1}^n y_t t}{n \sum_{t=1}^n t^2 - (\sum_{t=1}^n t)^2},$$

$$b = \frac{n \sum_{t=1}^n y_t t - \sum_{t=1}^n t \sum_{t=1}^n y_t}{n \sum_{t=1}^n t^2 - (\sum_{t=1}^n t)^2}.$$

Середнє квадратичне відхилення визначається із виразу

$$\sigma_{y_t} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y}_t)^2}{(n - 1)}},$$

де  $y_t$  - реальне навантаження,  $\bar{y}_t$  - навантаження, визначене із статичних характеристик,  $n$  - кількість точок.

Враховуючи викладене і використовуючи дані, наведені в таблицях 3 і 4 побудуємо статичні характеристики для трансформаторів Т1, Т2 ГПП.

Таблиця 3. Дані для формування статичних характеристик - ГПП (Т1)

$n$	$t (U_i)$	$y_t (P_i)$	$t^2$	$y_t t$	$\bar{y}_t (\bar{P}_t)$	$(y_t - \bar{y}_t)^2$
1	5,7	26690	32,49	152133,00	26666,67	544,44
2	5,8	26750	33,64	155150,00	26736,67	177,78
3	5,9	26800	34,81	158120,00	26806,67	44,44
4	6,0	26840	36,00	161040,00	26876,67	1344,44
5	6,1	26890	37,21	164029,00	26946,67	3211,11
6	6,2	27060	38,44	167772,00	27016,67	1877,78
7	6,3	27110	39,69	170793,00	27086,67	544,44
8	6,4	27150	40,96	173760,00	27156,67	44,44
9	6,5	27230	42,25	176995,00	27226,67	11,11
$\Sigma$	54,9	242520	335,49	1479792,00		7800,00

Коефіцієнти моделі:  $a = 22677; b = 700$ .

Статична характеристика для Т3 (ГПП-3)

$$\bar{P}_t = 22677 + 700U_t. \tag{6}$$

Середнє квадратичне відхилення  $\sigma_{y_t} = 31,22$ .

Таблиця 3 Дані для формування статичних характеристик - ГПП (Т2)

$n$	$t (U_i)$	$y_t (P_i)$	$t^2$	$y_t t$	$\bar{y}_t (\bar{P}_t)$	$(y_t - \bar{y}_t)^2$
1	5,7	21590	32,49	123063,00	21583,33	44,44
2	5,8	21650	33,64	125570,00	21630,83	367,36
3	5,9	21680	34,81	127912,00	21678,33	2,78
4	6,0	21700	36,00	130200,00	21725,83	667,36
5	6,1	21780	37,21	132858,00	21773,33	44,44
6	6,2	21800	38,44	135160,00	21820,83	434,03
7	6,3	21860	39,69	137718,00	21868,33	69,44
8	6,4	21900	40,96	140160,00	21915,83	250,69
9	6,5	22000	42,25	143000,00	21963,33	1344,44
$\Sigma$	54,9	195960	335,49	1195641,00		3225,00

Коефіцієнти моделі:  $a = 18876$ ;  $b = 475$ .

Статична характеристика для Т4 (ГПП-3)

$$\bar{P}_t = 18876 + 475U_t. \quad (7)$$

Середнє квадратичне відхилення  $\sigma_{y_t} = 20,08$ .

На рисунку 3 і 4 показані статичні характеристики для трансформаторів Т1, Т2 ГПП, які побудовані за регресійними залежностями (6) і (7), отриманими на підставі експериментальних досліджень.

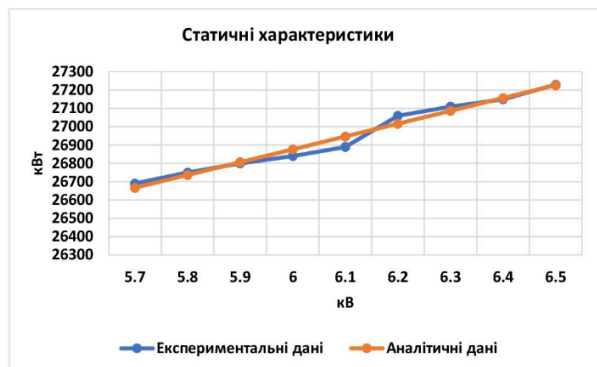


Рисунок 3 - статичні характеристики - Т1 ГПП

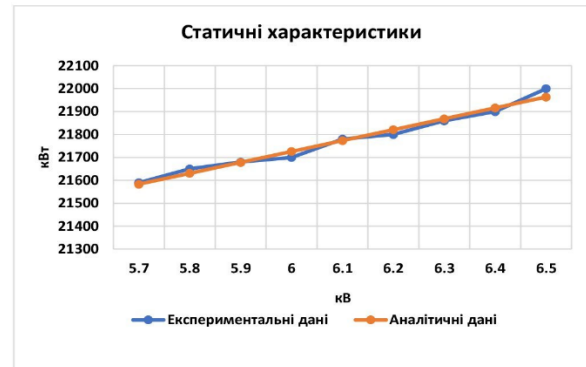


Рисунок 4 - статичні характеристики - Т2 ГПП

Процедура управління режимами напруги для регулювання навантаження реалізована в автоматизованій системі контролю електроспоживання [10].

Враховуючи допустимий обсяг спрацьовувань пристрою РПН, число варіантів його застосування обмежено, а глибина регулювання напруги становить 2-3 ступені.

**Висновки.** Показано, що доцільними є управління електроспоживанням як за рахунок управління споживачами-регуляторами, так і впливу на режими напруги системи електропостачання. В розрахунковій моделі навантаження мережі задається статичними характеристиками, що як правило, носять лінійний характер. Побудовано статичні характеристики на основі експериментальних даних, параметри моделі яких визначені методом найменших квадратів.

#### Список використаної літератури

1. Праховник А.В. Шляхи і етапи створення наукового напрямку з проблеми комплексного управління використанням електричної енергії/ Праховник А.В. / Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 1999. - № 1. – С. 58 – 70.
2. А.с. № 1334269. Способ управления потреблением электроэнергии предприятия / Праховник А.В., Кудовбенко К.П., Калинин В.П. - Оpubл. в Б.И., - 1987, - № 32.
3. Пат. 14062 Україна. Спосіб керування режимами електроспоживання підприємства // В.П. Калінчик.- Оpubл.25.04.97, Бюл.№2.- 6 с.
4. Калінчик В.П. Комплексне управління електричним навантаженням виробничих споживачів /Калінчик В.П. /Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 1999. - № 1. – С. 26 – 32.
5. Калінчик В.П. Оптимальне управління електричним навантаженням / Калінчик В.П., Калінчик І.В., Лук'яничук А.Д., Ткачук А.О. /Нац. техн. ун-т України „Київ. політехн. ін-т”. - Київ. 2009.- 12с.– Укр. – Деп. В ДНТБ України 12.10.09, № 95-Ук – 2009.
6. А.С. № 104733 Україна. Методологія комплексного управління режимами електроспоживання виробничих об'єктів/ Калінчик В.П., Калінчик В.В., Мельник Д.О., Філянін Д.В. / Бюлетень № 65.- 21.05.2021. - 7 с.
7. О.С. Яндутьський. Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії [текст]: Монографія / О.С. Яндутьський, Г.О. Труніна, А.Б.Нестерко - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.- 191 с.
8. В.П. Калінчик. Управління режимом реактивної потужності / В.П. Калінчик, В.А. Побігало, В.В. Калінчик, В.Г. Скосирев/ Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. - № 2(6)- 2021.-С.36-39.
9. Петренко Л.И. Электрические сети и системы / Петренко Л.И./ К.: Вища школа,1981.– 380 с.
10. В.П. Калінчик .Реалізація концепції Smart Grid для побудови системи обліку електроенергії/ В.П. Калінчик, В.А. Побігало, П.Д. Луців /Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. - № 2- 2020.-С.33-37.

V.P. Kalinchyk<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4028-0185

O. Borychenko<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6127-2945

V.V. Kalinchyk<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-3931-646X

O. Meita<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4132-5202

V. Pobigaylo<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2673-7329

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## CONTROL OF VOLTAGE MODES AS A MEANS OF LOAD REGULATION

*The article substantiates the regulation of power consumption modes of production facilities due to the management of voltage modes in the power supply system. It is shown that the regulation of electricity consumption with the help of consumers - regulators (CR) is quite often associated with losses that occur when the CR is turned off. Studies have shown that the management of voltage modes in the power supply system, which affects its level, can play a positive role in increasing the efficiency of the optimization of power consumption modes. It is shown that a comprehensive solution to the problem of power consumption management is expedient both at the expense of CR control and the influence on the voltage regimes of the power supply system. It is shown that the regulating effect of the load is characterized by static characteristics. Solving the problem of forming static characteristics is possible in two ways: through active experiments and based on the integration of static characteristics of individual consumers. Experimental studies were conducted to identify the static characteristics of the load. Experiments were carried out on transformers of the main step-down substation of the chemical industry enterprise, equipped with on-load tap-changers. Experimental static characteristics with linear changes are constructed. The parameters of the model are determined by the method of least squares. Constructed experimental and analytical static characteristics. The voltage mode control procedure for load regulation is implemented in the power consumption control system.*

**Keywords:** control, load, regulation, voltage, power consumption, static characteristics.

### References

1. Prakhovnyk, A.V. Ways and Stages of Establishing a Scientific Direction on the Issue of Comprehensive Management of Electricity Utilization. Scientific News of NTUU "KPI". – 1999. - № 1. – P. 58 – 70.
2. Patent No. 1334269. Method of Enterprise Electricity Consumption Management. Prakhovnyk, A.V., Kudovbenko K.P., Kalinchyk V.P. - Published in the Bulletin of Inventions, - 1987, - № 32.
3. Patent No. 14062 Ukraine. Method of Controlling Enterprise Electricity Consumption Modes. Kalinchyk V.P. - Published on 25.04.97, Bulletin №2. - 6 p.
4. Kalinchyk V.P. Comprehensive Management of Industrial Consumers' Electrical Loads. Scientific News of NTUU "KPI". – 1999. - № 1. – P. 26 – 32.
5. Optimal Management of Electrical Loads. Kalinchyk V.P., Kalinchyk I.V., Lukianchuk A.D., Tkachuk A.O. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". - Kyiv. 2009.- 12 p. – Ukr. – Deposited in DNTB of Ukraine on 12.10.09, No. 95-Ukr – 2009.
6. Patent No. 104733 Ukraine. Methodology of Comprehensive Management of Industrial Objects' Electricity Consumption Modes. Kalinchyk V.P., Kalinchyk V.V., Melnyk D.O., Filyanin D.V. / Bulletin № 65.- 21.05.2021. - 7 p.
7. Regulation of Voltage in Distribution Electric Networks with Renewable Energy Sources [text]: Monograph / O.S. Yandulsky, G.O. Trunina, A.B. Nesterko - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021.- 191 p.
8. Management of Reactive Power Mode. Kalinchyk V.P., Pobigaylo V.A., Kalinchyk V.V., Skosyrev V.G. Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Problems of Improving Electric Machines and Devices. Theory and Practice. - No. 2(6)- 2021.-P.36-39.
9. Petrenko, L.I. Electric Networks and Systems. Kyiv: Higher School, 1981.– 380 p.
10. Kalinchyk V.P., Pobigaylo V.A., Lutsiv P.D. Implementation of the Smart Grid Concept for Building an Electricity Metering System. Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Problems of Improving Electric Machines and Devices. Theory and Practice. - No. 2- 2020.-P.33-37.

Надійшла: 16.10.2023

Received: 16.10.2023