

*В.П. КАЛІНЧИК, В.А. ПОБІГАЙЛО, В.В. КАЛІНЧИК, О.В. МЕЙТА, Ю.М. ЧУНЯК*

## УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ВИРОБНИЧИХ СПОЖИВАЧІВ

В статті досліджуються моделі та методи комплексного управління режимами електроспоживання. Показано, що дефіцит потужності в години пікових навантажень ускладнює підтримання балансу між потужностями генерації та споживання, що привело до необхідності введення обмежень електричного навантаження виробничих споживачів і розвитку методів і засобів управління режимами електроспоживання. Причому задачі управління режимами активного електроспоживання і компенсації реактивної потужності тісно пов'язані. Показано, що на даний час відомі наступні методи управління електроспоживанням: по миттєвій нормі; по ідеальній нормі; управління по прогнозній величині; управління з використанням усередненої потужності на рухомому інтервалі часу (метод «рухомого вікна»). Оптимальне управління режимами системи електроспоживання і режимами реактивної потужності на відповідний період управління здійснюється на основі використання методів оперативного прогнозування. Дослідження показали, що позитивну роль в підвищенні ефективності оптимізації режимів електроспоживання може зіграти і впливаюче на його рівні управління режимами напруги в системі електропостачання. В зв'язку з цим доцільним представляється перехід до комплексного вирішення проблеми управління електроспоживанням як за рахунок управління споживачами – регуляторами, так і впливанням на режими напруги системи електропостачання. Приведені статичні характеристики змін активної і реактивної потужностей від змін напруги в системі електропостачання. Вирішення завдання отримання статичних характеристик можливе в результаті здійснення активних експериментів; або на основі інтегрування статичних характеристик окремих електроприймачів. Орієнтація на другий шлях доцільна при обмеженому числі різнотипних електроприймачів. Однак, в будь-якому випадку слід визначити статичні характеристики окремих великих споживачів – регуляторів, відключення або включення яких може помітно вплинути на інтегральну статичну характеристику центру живлення. Запропоновано підхід до комплексного управління режимами електроспоживання, який заключається в тому, що з початку контрольованого інтервалу періодично формуються реальні величини споживання активної та реактивної електроенергії, а також значення напруги в контрольованій точці мережі. Надалі здійснюється прогноз споживання активної та реактивної енергії до кінця контрольованого інтервалу і прогноз середнього значення рівня напруги, визначається відхилення між прогнозними та заданим електроспоживанням і, якщо прогнозне значення електроспоживання перевищує задане, визначають можливе зниження потужності а рахунок зниження напруги і за рахунок відключення споживачів – регуляторів. Одночасно визначають можливі зміни реактивної потужності і, при необхідності, здійснюють управління конденсаторними батареями. Проведені експериментальні дослідження розглянутих моделей. Приведена структурна схема системи комплексного контролю і управління режимами електроспоживання.

**Ключові слова:** моделі режими електроспоживання, управління, прогноз, активна потужність, реактивна потужність, статичні характеристики.

*V.P. KALINCHYK, V.A. POBIGAYLO, V.V. KALINCHYK, O.V. MEITA, O.M. CHUNYAK*

## CONTROL OF ELECTRICITY CONSUMPTION REGIMES OF PRODUCERS CONSUMERS

The article investigates models and methods of complex control of power consumption modes. It is shown that the power shortage during peak hours makes it difficult to maintain a balance between generation and consumption capacity, which led to the need to impose restrictions on the electrical load of industrial consumers and the development of methods and tools to control power consumption. Moreover, the tasks of controlling the modes of active power consumption and reactive power compensation are closely related. It is shown that the following methods of power consumption management are currently known: instantaneous rate; at the ideal rate; management on the forecast value; control with the use of average power on a moving time interval ("moving window" method). Optimal control of power consumption system modes and reactive power modes for the relevant control period is based on the use of operational forecasting methods. Studies have shown that a positive role in improving the efficiency of optimization of power consumption modes can play and influencing its level of voltage control in the power supply system. In this regard, it is advisable to move to a comprehensive solution to the problem of power management, both through the management of consumers - regulators, and the impact on the voltage regimes of the power supply system. Static characteristics of changes in active and reactive powers from voltage changes in the power supply system are given. Solving the problem of obtaining static characteristics is possible as a result of active experiments; or based on the integration of static characteristics of individual electrical receivers. Focus on the second way is advisable with a limited number of different types of electrical receivers. However, in any case, it is necessary to determine the static characteristics of individual large consumers - regulators, disabling or enabling which can significantly affect the integrated static characteristics of the power supply. An approach to integrated management of power consumption modes is proposed, which consists in the fact that from the beginning of the controlled interval periodically formed real values of active and reactive electricity consumption, as well as voltage values at the controlled point of the network. Then the forecast of active and reactive energy consumption to the end of the controlled interval and the forecast of the average voltage level is determined, the deviation between the forecast and set power consumption is determined and, if the forecast value of power consumption exceeds the set. At the same time determine the possible changes in reactive power and, if necessary, control the capacitor banks. Experimental studies of the considered models are carried out. The structural scheme of the system of complex control and management of power consumption modes is given.

**Keywords:** models power consumption modes, control, forecast, active power, reactive power, static characteristics.

**Вступ.** Дефіцит потужності в години пікових навантажень ускладнює підтримання балансу між потужностями генерації та споживання. Все це привело до необхідності введення обмежень електричного навантаження виробничих споживачів і розвитку методів і засобів управління режимами електроспоживання [1-4].

Забезпечення економічності передачі і розподілу електроенергії невіддільне від постановки і рішення задач, пов'язаних зі зниженням втрат електроенергії в електричних мережах. Одним з найбільш ефективних способів зниження втрат електроенергії, а також підвищення її якості на затискачах електроприймачів є

компенсація реактивної потужності, що здійснюється за допомогою різних компенсуючих пристроїв. Причому задачі управління режимами активного електроспоживання і компенсації реактивної потужності тісно пов'язані.

**Метою роботи** є розробка комплексного підходу для вирішення задачі управління режимами електроспоживанням.

**Аналіз методів управління режимами електроспоживання.** На даний час відомі наступні методи управління електроспоживанням [5-10]: по миттєвій нормі; по ідеальній нормі; управління по прогнозній величині; управління з використанням усередненої

потужності на рухомому інтервалі часу (метод рухомого вікна) і комбіновані методи, що використовують різні сполучення, а також по розподілу управляючого впливу між споживачами – регуляторами (метод розподілу ресурсів). Розглянуті методи направлені реалізацію управління режимом активної потужності.

Управління режимом реактивної потужності здійснюється на підставі директивних документів [11], направлених на підвищення техніко-економічної ефективності функціонування електричних мереж. Причому, відповідно до директивних документів необхідно здійснювати контроль реактивного електроспоживання і контроль генерації реактивної потужності в години мінімального активного електроспоживання (нічний провал). Оптимальне управління режимами системи електроспоживання і режимами реактивної потужності на відповідний період управління здійснюється на основі використання методів оперативного прогнозування [12, 13].

Проте, як було зазначено, задачі управління режимом активної і реактивної потужності тісно пов'язані, що висуває вимогу розробки та реалізації комплексного підходу до управління режимами електроспоживання.

**Викладення основного матеріалу.** Дослідження [14-17] показують, що позитивну роль в підвищенні ефективності оптимізації режимів електроспоживання може зіграти і впливаюче на його рівні управління режимами напруги в системі електропостачання (СЕ). В зв'язку з цим доцільним представляється перехід до комплексного вирішення проблеми управління електроспоживанням як за рахунок управління споживачами – регуляторами (СР), так і впливанням на режими напруги СЕ.

Вирішення цього завдання можливе двома шляхами: а) в результаті здійснення активних експериментів; б) на основі інтегрування статичних характеристик окремих електроприймачів (ЕП). Орієнтація на другий шлях доцільна при обмеженому числі різнотипних ЕП. Однак, в будь-якому випадку слід визначити статичні характеристики окремих великих СР, відключення або включення яких може помітно вплинути на інтегральну статичну характеристику центру живлення.

На рис. 1 показані статичні характеристики змін активної (рис. 1, а) і реактивної (рис. 1, б) потужностей. Причому, якщо при зниженні напруги активна потужність однозначно зменшується, то реактивна в залежності від статичних характеристик може і зменшуватись і збільшуватись.

Суть запропонованого підходу до комплексного управління режимами електроспоживання заключається в тому, що з початку контрольованого інтервалу Т (рис. 2) періодично через проміжок часу Δt (Δt=T/N, де N – число точок контролю) формуються реальні величини споживання активної Wτ та реактивної WQτ електроенергії, а також значення напруги Uτ в контрольованій точці мережі.

За відомими алгоритмами [14-17] здійснюється прогноз споживання активної  $\hat{W}T$  та реактивної  $\hat{W}QT$  енергії до кінця контрольованого інтервалу Т і прогноз середнього значення рівня напруги  $\hat{U}(T-\tau)$  на інтервал часу T-τ (τ=k Δt, k=1,2, ..., N- поточна точка контролю).

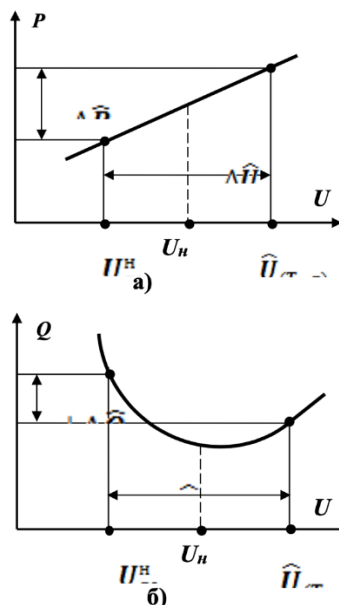


Рис. 1. Статичні характеристики змін активної і реактивної потужностей

Надалі визначається величина відхилення  $\Delta \hat{W}T$  між прогнозним  $\hat{W}T$  і заданим  $W_3$  на інтервал Т значенням активного електроспоживання, тобто

$$\Delta \hat{W}T = \hat{W}T - W_3 \tag{1}$$

В тому випадку, якщо  $\Delta \hat{W}T > 0$ , то здійснюється управління споживанням активної енергії.

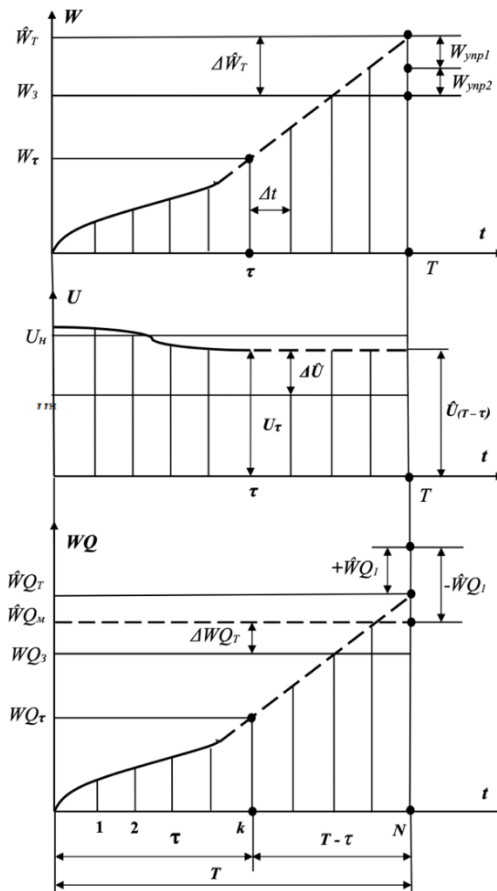


Рис. 2. Принцип комплексного управління режимами електроспоживання

Для цього визначають величину можливого зниження напруги  $\Delta\hat{U}$  з урахуванням нормативних обмежень для рівнів напруги в контрольованій точці мережі

$$\Delta\hat{U} = \Delta\hat{U} - U_{\text{доп}}^{\text{н}}, \quad (2)$$

де  $U_{\text{доп}}^{\text{н}}$  - нижній допустимий рівень напруги.

За статичними характеристиками (рис. 1, а) визначається величина активної потужності  $\Delta\hat{P}$ , що зменшується за рахунок зниження напруги на  $\Delta\hat{U}$ , тобто перша управляюча дія

$$W_{\text{упр1}} = \Delta\hat{P} (T - \tau). \quad (3)$$

Після цього визначають необхідну величину зниження активного електроспоживання за рахунок споживачів – регуляторів, тобто другу управляючу дію

$$W_{\text{упр2}} = \Delta\hat{W}T - W_{\text{упр1}}. \quad (4)$$

Формується управляюча дія на відключення СР на величину  $W_{\text{упр2}}$

$$W_{\text{упр2}} = (T - \tau) \sum_{i=1}^n P_i, \quad (5)$$

де  $P_i$  – потужність і-го СР.

За статичними характеристиками, рис. 1, б, визначають зміну споживання реактивної потужності  $\pm\Delta\hat{Q}_1$ , яке отримується за рахунок зниження напруги на величину  $\Delta\hat{U}$  і величину реактивного електроспоживання, що змінюється при цьому

$$\pm\Delta WQ_1 = \pm\Delta\hat{Q}_1 (T - \tau). \quad (6)$$

За паспортними даними споживачів – регуляторів визначають величину зміни реактивної потужності  $\pm\Delta\hat{Q}_2$ , що отримується за рахунок сумарного зниження активної потужності СР на величину  $\sum_{i=1}^n P_i$  і величину споживання реактивної енергії, що при цьому змінюється

$$\pm\Delta WQ_2 = \pm\Delta\hat{Q}_2 (T - \tau). \quad (7)$$

Визначається величина можливого споживання реактивної енергії  $\hat{W}Q_M$  до кінця інтервалу контролю  $T$  (рис. 2)

$$\hat{W}Q_M = \hat{W}Q_T \pm \Delta WQ_1 \pm \Delta WQ_2. \quad (8)$$

Визначається величина відхилення між можливим  $\hat{W}Q_M$  та заданим  $WQ_3$  на інтервал  $T$  значеннями реактивного електроспоживання

$$\Delta WQ_T = \hat{W}Q_M - WQ_3. \quad (9)$$

Якщо  $\Delta WQ_T > 0$  то здійснюється компенсація реактивної енергії на величину  $\Delta WQ_T$ , що визначається як

$$WQ_T = (T - \tau) \sum_{i=1}^n Q_{ci}. \quad (10)$$

де  $Q_{ci}$  – реактивна потужність однієї секції компенсуючого пристрою.

Якщо величина відхилення активного електроспоживання  $\Delta\hat{W}T \leq 0$  (управління споживанням активної енергії не виконується), то величину відхилення  $\Delta WQ_T$  визначають

$$\Delta WQ_T = \hat{W}Q_T - WQ_3 \quad (11)$$

і якщо  $\Delta WQ_T > 0$ , то здійснюється управління режимом реактивного електроспоживання відповідно до розглянутих принципів.

Розглянутий підхід реалізований в системі контролю і управління режимами електроспоживання, представлений на рис. 3.

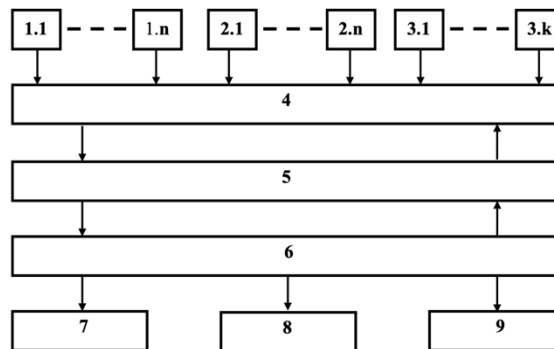


Рис. 3. Система управління режимами електроспоживання

В цій системі: 1.1, ..., 1.n – вимірювачі активної енергії, 2.1, ..., 2.n – вимірювачі реактивної енергії, 3.1, ..., 3.k – вимірювачі рівнів напруги у вузлах навантаження, 4 – блок приймання інформації, 5 – обчислювальний блок, 6 – блок узгодження, 7 – блок управління споживачами – регуляторами, 8 – блок управління регуляторами напруги і 9 – блок управління компенсуючими пристроями.

*Примітка:* вимірювачі активної і реактивної енергії і рівнів напруги можуть бути об'єднані в єдиному багатофункціональному пристрої.

В запропонованому підході і системі розглянуті тісно пов'язані принципи комплексного управління режимами електроспоживання як по активній, так і по реактивній потужності.

**Висновок.** В статті показано, що задачі управління режимами електроспоживання і компенсації реактивної потужності тісно пов'язані між собою і, що позитивну роль в підвищенні ефективності оптимізації режимів електроспоживання може зіграти і впливаюче на його рівні управління режимами напруги в системі електропостачання. В зв'язку з цим доцільним представляється перехід до комплексного вирішення проблеми управління режимами електроспоживання як за рахунок управління споживачами – регуляторами для активного електроспоживання і управління компенсуючими пристроями для реактивного електроспоживання, так і впливанням на режими напруги системи електропостачання.

#### Список літератури:

1. Праховник А.В. Програма управління енергоиспользованием в Украине. Управление використанням енергії. Київ. 1995. С. 21-26.
2. Праховник А.В. Комплексне управління використанням електричної енергії. Энергия будущего века. 1999. №1. С.9-14.
3. Складаров В.Ф., Праховник А.В. Концепция и пути автоматизации управления электропотреблением. Киев; О-во «Знание» УССР. 1987. 16 с.
4. Калінчик В.П. Методология оперативного управління споживанням електричної енергії. Энергетика: економіка, технології, екологія. 2013. № 1. С. 47-51.
5. Калінчик В.П., Несен Л.І., Суменко К.Ю. Застосування методу ідеальної норми для диспетчерського регулювання максимуму навантаження. НТУУ „КПІ” Н.-д. ін-т автоматики та енергетики „Енергія”. Київ, 2013. 9 с.: іл. Бібліогр.: 5 назв. Укр. Деп. в ДНТБ України 18.04.13, № 10 – Ук 2013.
6. Калінчик В.П., Несен Л.І., Витвицький О.В. Огляд і аналіз

- методів управління електроспоживанням/ Збірник наукових праць. Матеріали XXXVII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції „Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії” – Переяслав-Хмельницький. – 2017.- С.160-163.
7. Праховник А.В. Методы и средства управления электропотреблением. - Киев: Общество “Знание”, 1981. - 25 с.
  8. Праховник А.В. Автоматизация управления электропотреблением. // Изв. вузов. Энергетика, - 1984, - № 12, - С. 3 - 10.
  9. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. - М.: Недра, - 1985, - 231с.
  10. 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.
  11. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії. Наказ по Міністерству України. 30.11.2020 № 764. [Електронний ресурс]. 2021. 18 с. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0109-21#Text>
  12. Калінчик В.П., Несен Л.І., Калінчик В.В.. Комбіновані моделі прогнозування електроспоживання /Збірник наукових праць. Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії» – Переяслав-Хмельницький. – 2019.- С.133-135..
  13. В.П. Калінчик, В.А. Побігайло, В.В. Калінчик, В.Г. Скоцирев. Управління режимом реактивної потужності /Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. - № 2(6)- 2021.-С.36-39.
  14. А.С. 1334269 СССР. Способ управления потреблением электроэнергии предприятием / Праховник А.В., Кудовбенко К.П., Калінчик В.П. - Оpubл. 30.08.87, Бюл. № 32. - 6 с.
  15. Маркушевич Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 100 с.
  16. Пат. 14062 Україна. Спосіб керування режимами електроспоживання підприємства // Калінчик В.П. - Оpubл.25.04.97, Бюл.№2.- 6с.
  17. Bindu R. Day-Ahead Load Forecasting Using Exponential Smoothing/ R. Bindu, Dr. Eng. M. Chindri, G.V. Pop// Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures. - Vol. 6. – 2009. - pp. 89-93
  4. Kalinchyk V.P. Metodologhija operativnogho upravlinnja spozhyvannjam elektrychnoji energhiji. Energheytka: ekonomika, tekhnologhiji, ekologhija. 2013. no 1. Pp. 47 – 51.
  5. Kalinchyk V.P., Nesen L.I., Sumenko K.Ju. Zastosuvannja metodu idealnoji normy dlja dyspetcherskogo rehuljuvannja maksimumu navantazhennja. NTUU „KPI” N.-d. in-t avtomatyky ta energhetiky „Energhija”. Kyiv, 2013. – 9 p.: il. – Biblioghr.: 5 nazv. Ukr. Dep. v DNTB Ukrainy 18.04.13, no 10. Uk 2013.
  6. Kalinchyk V.P., Nesen L.I., Vytvyckyj O.V. Oghljad i analiz metodiv upravlinnja elektrospozhyvannjam. Zbirnyk naukovykh pracj. Materialy XKKhKhVII Mizhnarodnoji naukovo-praktychnoji internet-konferenciji „Problemy ta perspektyvy rozvytku nauky na pochatku tretjogho tysjacholittja u krajinh Jevropy ta Aziji”. Perejaslav-Khmeljnycykj. 2017. Pp.160-163.
  7. Prahovnik A.V. Metody i sredstva upravlenija jelektropotrebleniem. Kiev: Obshestvo “Znanie”, 1981. 25 p.
  8. Prahovnik A.V. Avtomatizacija upravlenija jelektropotrebleniem. Izv. vuzov. Energetika, 1984, no 12, Pp. 3-10.
  9. Prahovnik A.V., Rozen V.P., Degtjarev V.V. Energoberegajushhie rezhimy elektrosnabzhenija gornodobyvajushhijh predprijatij. Moscow: Nedra, 1985, 231 p.
  10. А.С. 104733 Ukrainina. Metodologhija kompleksnogho upravlinnja rehzymamy elektrospozhyvannja vyrobnychkh objektiv. Kalinchyk V.P., Kalinchyk V.V., Meljnjk D.O., Filjanin D.V. Bjuletenj 65. 21.05.2021. 7 p.
  11. Metodyka obchyslennja platy za peretikannja reaktivnoji elektroenerghiji. Nakaz po Minenergho Ukrainy. 30.11.2020 no 764. [Elektronnyj resurs]. 2021. 18 p. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0109-21#Text>
  12. Kalinchyk V.P., Nesen L.I., Kalinchyk V.V. Kombinovani modeli proghnozuvannja elektrospozhyvannja. Zbirnyk naukovykh pracj. Materialy KhVI Mizhnarodnoji naukovo-praktychnoji internet-konferenciji «Problemy ta perspektyvy rozvytku suchasnoji nauky v krajinh Jevropy ta Aziji». Perejaslav-Khmeljnycykj. 2019. Pp.133-135.
  13. Kalinchyk V., Pobigaylo V., Kalinchyk V., Skosyrev, V. Reactive power control, Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice, 2 (6), 2021, pp. 36–39. doi: 10.20998/2079-3944.2021.2.07.
  14. А.С. 1334269 SSSR. Sposob upravlenija potrebleniem jelektrojenergiji predprijatiem. Prahovnik A.V., Kudovbenko K.P., Kalinchik V.P. Opubl. 30.08.87, Bjul. no 32. 6 p.
  15. Markushevich N.S. Regulirovanie naprjazhenijam i ekonomija jelektrojenergiji. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 100 p.
  16. Pat. 14062 Ukrainina. Cnocib keruvannja rehzymamy elektrospozhyvannja pidprijemstva. Kalinchyk V.P. Opubl.25.04.97, Bjul. 2.- 6 p.
  17. Bindu R., Chindri M., Pop G.V. Day-Ahead Load Forecasting Using Exponential Smoothing. Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures. Vol. 6. 2009. Pp. 89-93

#### References (transliterated):

1. Prahovnik A.V. Programma upravlenija jenergoispol'zovaniem v Ukraine. Upravlinnja vikoristannjam energiji. Kyiv. 1995. Pp. 21-26.
2. Prakhovnyk A.V. Kompleksne upravlinnja vykorystannjam elektrychnoji energhiji. Energija budushhego veka. 1999. No 1. Pp. 9-14.
3. Skljjarov V.F., Prahovnik A.V. Koncepcija i puti avtomatizacii upravlenija jelektropotrebleniem. Kiev; O-vo «Znanie» USSR.1987. 16 p.

Поступила (received) 20.03.22

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Калінчик Василь Прокопович (Kalinchyk Vasylyl Prokopovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ, тел.: (067) 209-87-26.

**Побігайло Віталій Анатолійович (Pobigaylo Vitaliy Anatolievich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2673-7329>; e-mail: [pobigaylo@gmail.com](mailto:pobigaylo@gmail.com); тел.: (097) 308-88-95.

**Калінчик Віталій Васильович (Kalinchyk Vitaliy Vasilivich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри охорони праці та промислової життєдіяльності; м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3931-646X>; тел.: (067) 209-87-26.

**Мейта Олександр Володимирович (Meita Aleksandr Vladimirovich)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних та мехатронних комплексів, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» м. Київ; тел.: (097) 139-88-48.

**Чуняк Юлія Миколаївна (Chunya Uliya Mikolayvna)** – асистент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4506-912X>; тел.: (097) 309-13-39.