

**А. В. Камінський, к. т. н.; В. В. Камінський, к. т. н.**

## **МАТЕМАТИЧНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАПАСІВ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ**

*У роботі проаналізовано та формалізовано поняття запасу пропускної здатності силового елемента електропостачальної системи (ЕПС) із урахуванням усіх умов допустимої експлуатації цього елемента. Запропоновані математична та комп'ютерна моделі процесів визначення запасу пропускної здатності кабельних ліній, придатні до використання в умовах розширення виробництва, модернізації технологічних процесів та підключення нових споживачів електроенергії до існуючої електромережі.*

**Ключові слова:** *запас пропускної здатності, розрахункове навантаження, допустимість режиму роботи елемента ЕПС, математична модель, комп'ютерна модель, пасивні та активні обмеження, кабельна лінія.*

### **Вступ**

Ефективність капіталовкладень в електропостачальні системи (ЕПС) формується вже на початкових стадіях їх проектування у процесі визначення електронавантажень силових елементів ЕПС. Зниження розрахункових електронавантажень може призвести до недостатньої пропускної здатності елементів ЕПС та їх передчасного виходу з ладу, а завищення – до необґрунтованого збільшення капіталовкладень на їх спорудження та погіршення електромагнітної сумісності елементів ЕПС. Зважаючи на важливість точного прогнозування розрахункових навантажень, методи їх визначення регламентуються з 1961 року [1], а наукові роботи по удосконаленню та уточненню цих методів залишаються актуальними до цього часу (дивись, наприклад, [2 – 5]).

З 1961 року редакція нормативного документу [1] декілька раз зазнавала змін та уточнень, які враховували нові результати досліджень електронавантажень елементів ЕПС. На сьогодні в Україні діючим аналогом цього документу є керівні технічні матеріали [6].

Згідно [6] розрахунковим називається умовно незмінне навантаження елемента ЕПС, яке еквівалентне реальному змінному в часі навантаженню цього елемента за максимальною температурою його нагрівання.

Як відомо, для різних провідників в [7] нормується максимально допустимий струм, що відповідає тривало допустимій температурі нагрівання провідника. За відомого розрахункового навантаження елемента ЕПС стає можливим застосувати ці нормовані значення струму для випадку змінного в часі навантаження.

Близьким за значенням до поняття розрахункового навантаження є поняття запасу пропускної здатності силового елемента ЕПС. На відміну від відомих на цей час робіт, присвячених створенню нових та удосконаленню існуючих методів визначення розрахункових навантажень, у цій роботі розглянуто задачу визначення запасів пропускної здатності елементів ЕПС у процесі їх експлуатації. Поняття запасу пропускної здатності на цей час ще не має формального загально прийнятого визначення. У цій роботі зроблено спробу ввести чітке визначення на основі інтуїтивного розуміння запасу пропускної здатності як максимально можливої величини навантаження, що здатен нести елемент ЕПС понад існуюче його навантаження. Показано, що методи визначення розрахункового навантаження та визначення запасів пропускної здатності елементів ЕПС не можуть бути формально зведені один до одного. Якщо у процесі визначення розрахункових навантажень силових елементів ЕПС необхідно виходити із максимально допустимих температур нагрівання цих елементів, то,

визначаючи запаси їх пропускної здатності, необхідно враховувати також інші умови їхньої експлуатації.

### Постановка задачі

У процесі експлуатації електропостачальних систем може виникнути необхідність у визначенні величини додаткового навантаження, яке здатен нести існуючий елемент ЕПС. Для існуючих зовнішніх ліній живлення та розподільних мереж споживачів електроенергії така необхідність може виникнути у зв'язку із розширенням виробництва, модернізацією технологічних процесів, підключенням нових споживачів електроенергії та з інших причин. У цих випадках оцінку запасів пропускної здатності ліній електропередач виконують, як правило, за допустимими струмами, регламентованими ПУЕ [7], використовуючи поняття запасу пропускної здатності за аналогією до поняття розрахункового навантаження. Така оцінка дає можливість забезпечити допустимість нагрівання елемента ЕПС у випадку збільшення його навантаження в межах знайденого запасу пропускної здатності. Однак, допустимість режиму роботи елемента ЕПС визначається не тільки умовою допустимого нагрівання цього елемента в нормальному режимі роботи. На його пропускну здатність впливає також нагрівання в післяаварійному режимі з врахуванням допустимого перевантаження та потужності споживання в такому режимі, втрата напруги в нормальному та післяаварійному режимах роботи та інші умови. Результати досліджень, виконаних авторами, показали, що неврахування цих умов може призвести до суттєвих помилок в оцінці запасів пропускної здатності елементів ЕПС.

Із сказаного випливає, що інтуїтивне розуміння запасу пропускної здатності (ЗПЗ) елемента ЕПС потребує уточнення. Далі наведено формальне визначення цього поняття, а також запропоновані математична та комп'ютерна моделі визначення величини запасу пропускної здатності кабельної лінії за експериментальними даними про режим її роботи. Показано, що у процесі визначення ЗПЗ на основі цих моделей доцільно використати методи розв'язання задач лінійного програмування, але загальний алгоритм розв'язування задачі повинен бути доповнений у зв'язку із специфічними особливостями поставленої задачі.

### Основні результати

Далі під запасом пропускної здатності елемента ЕПС автори пропонують розуміти максимально можливе значення повної потужності  $S_3$ , яку додатково здатен нести цей елемент за умови виконання всіх обмежень, які визначають допустимість умов його експлуатації.

Розглянемо особливості задачі визначення запасу пропускної здатності кабельної лінії (КЛ). Аналіз показує, що виконання більшості умов допустимої експлуатації різних елементів ЕПС безпосередньо залежить від величини  $S_3$ . Але існують також умови, виконання яких не залежить від цієї величини. Незважаючи на це, такі умови теж повинні враховуватися у процесі визначення запасу пропускної здатності елементів ЕПС. Наприклад, очевидно, що збільшення навантаження КЛ впливає на виконання умови її допустимого нагрівання, але воно може ніяк не вплинути на виконання умови допустимого короткочасного нагрівання цієї лінії струмом короткого замикання (СКЗ), якщо величина СКЗ на початку лінії залишиться незмінною. Відповідні умови можна записати у вигляді:

$$k_{\text{доп}} \cdot I_{\text{доп}}(F) \geq I_p + \frac{S_3}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (1)$$

$$F \geq F_{\text{кз}} = \frac{I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{t_{\text{п}}}}{C}, \quad (2)$$

де  $k_{\text{доп}} = k_c \cdot k_{\text{п}}$  – коефіцієнт допустимого навантаження (уточнює значення допустимого струму для конкретних умов експлуатації лінії);  $k_c$ ,  $k_{\text{п}}$  – коефіцієнти середовища та прокладки від-

повідно (враховують відмінність параметрів середовища та умов прокладки лінії від прийнятих в ПУЕ [7] при складанні таблиць допустимих струмів);  $I_{\text{доп}}(F)$  – допустимий струм КЛ перерізом  $F$  згідно ПУЕ;  $I_p$  – розрахунковий струм КЛ, який відповідає існуючому навантаженню цієї лінії;  $U$  – напруга мережі;  $F_{\text{кз}}$  – мінімальний переріз лінії за умовою термічної дії СКЗ (визначається за нормативними методами розрахунку термічної дії СКЗ);  $I_{\text{кз}}$ ,  $t_n$  – струм та приведений час короткого замикання на початку КЛ;  $C$  – нормований параметр, значення якого залежить від марки КЛ.

Умова (1) записана для випадку рівності коефіцієнтів потужності існуючого розрахункового навантаження лінії та додаткового її навантаження  $S_3$ . Саме за цих умов додаткове навантаження  $S_3$  викличе максимальне збільшення діючого значення струму, а, відповідно, і температури нагрівання лінії. Оскільки у процесі визначення запасу пропускної здатності параметри додаткового навантаження (і, зокрема, його коефіцієнт потужності) можуть бути невідомими, то надалі ми також будемо виходити із цього найбільш несприятливого припущення.

Назвемо умови допустимої експлуатації елемента ЕПС, виконання яких залежить від величини  $S_3$ , *активними* в задачі визначення запасу пропускної здатності цього елемента, а всі інші умови – *пасивними* в цій задачі. Очевидно, умова (1) є активною, а умова (2), записана для випадку віддаленої від джерел живлення точки К.З., є пасивною, оскільки в цьому випадку її виконання не залежить від величини  $S_3$ .

Вимагаючи виконання всіх умов допустимої експлуатації елемента ЕПС у визначенні величини  $S_3$  автори виходили з такого. Виконання пасивних умов згідно їхнього означення не залежить від величини  $S_3$ . Тому, якщо хоч одна пасивна умова не виконується, то це означає, що відповідний елемент ЕПС працює в недопустимих умовах навіть без збільшення його навантаження і підлягає заміні. Якщо за таких умов ми знайдемо запас його пропускної здатності, враховуючи лише активні умови задачі, і виявиться, що  $S_3 > 0$ , то це може ввести в оману особу, яка буде приймати рішення щодо допустимості роботи цього елемента після збільшення його навантаження. Адже, збільшуючи навантаження елемента ЕПС на величину  $\Delta S \leq S_3$ , ми погіршуємо умови його експлуатації, але навантаження елемента залишається допустимим. Якщо ж існуючі умови роботи елемента ЕПС допустимо навіть погіршити, то логічно вважати, що до погіршення вони теж були допустимими. Але це не так, оскільки одна із пасивних умов, як це було прийнято, була і залишиться недопустимою. Щоб уникнути подібної ситуації, пропонуємо у процесі визначення запасу пропускної здатності перевіряти як активні, так і пасивні умови, а у випадку невиконання хоча б однієї пасивної умови вважати, що  $S_3 = 0$ .

Враховуючи вищенаведене, математична модель визначення запасу пропускної здатності КЛ буде мати вигляд:

$$f(S_3) = S_3 \rightarrow \max_{S_3}, \quad (3)$$

$$k_{\text{доп}} \cdot I_{\text{доп}}(F) \geq I_p + \frac{S_3}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (4)$$

$$k_{\text{па}} \cdot k_{\text{доп}} \cdot I_{\text{доп}}(F) \geq k_{\text{зна}} \cdot k_{\text{нна}} \cdot \left( I_p + \frac{S_3}{\sqrt{3} \cdot U} \right), \quad (5)$$

$$\frac{r_0(F) \cdot (P_p + S_3 \cdot \cos(\varphi)) + x_0(F) \cdot (Q_p + S_3 \cdot \sin(\varphi))}{10 \cdot U^2} \cdot L \leq \Delta U_{\text{ндоп}}, \quad (6)$$

$$\frac{r_0(F) \cdot (P_p + S_3 \cdot \cos(\varphi)) + x_0(F) \cdot (Q_p + S_3 \cdot \sin(\varphi))}{10 \cdot U^2} \cdot L \cdot k_{\text{зна}} \cdot k_{\text{нна}} \leq \Delta U_{\text{падоп}}, \quad (7)$$

$$F \geq \frac{I_{\text{КЗ}} \cdot \sqrt{t_{\text{п}}}}{C}, \quad (8)$$

де  $k_{\text{па}}$  – коефіцієнт максимально допустимого перевантаження ЛЖ в післяаварійному режимі згідно ПУЕ;  $k_{\text{зпа}}$  – коефіцієнт збільшення навантаження в післяаварійному режимі роботи КЛ (показує у скільки разів збільшується навантаження в післяаварійному режимі роботи КЛ);  $k_{\text{ппа}}$  – частка загального навантаження, яке повинно споживатися в післяаварійному режимі роботи КЛ;  $P_{\text{р}}$ ,  $Q_{\text{р}}$  – відповідно активна та реактивна розрахункові потужності КЛ;  $\cos(\varphi)$  – коефіцієнт потужності;  $r_0(F)$ ,  $x_0(F)$  – відповідно питомі активний та реактивний опори лінії перерізом  $F$ ;  $\Delta U_{\text{ндоп}}$ ,  $\Delta U_{\text{падоп}}$  – допустимі втрати напруги у КЛ в нормальному та післяаварійному режимах роботи лінії відповідно.

Як бачимо, особливістю отриманої математичної моделі є наявність в ній не тільки активних умов (4) – (7), але й пасивної умови (8). Якщо відкинути пасивну умову, то ми отримаємо звичайну задачу лінійного програмування, в якій показником ефективності є діагональна функція  $f(S_3)$ , керованою змінною – величина  $S_3$ , а умови (4) – (7) грають роль обмежень на керовану змінну.

Виконаний авторами аналіз задач визначення запасів пропускної здатності інших силових елементів ЕПС показав, що кількість пасивних умов може бути більшою.

Оскільки виконання пасивних умов не залежить від шуканої величини, то для розв'язання поставленої задачі доцільно спочатку перевірити виконання всіх наявних пасивних умов (у цьому випадку умови (8)). Якщо хоч одна пасивна умова не виконується, то пошук величини  $S_3$  втрачає сенс. У цьому випадку необхідно прийняти  $S_3 = 0$ .

Якщо ж усі пасивні умови виконуються, то для визначення величини  $S_3$  необхідно розв'язати задачу (3) – (7), використовуючи відомі методи лінійного програмування.

Іншою особливістю цієї задачі є те, що, як видно із математичної моделі (3) – (8), для її розв'язання необхідно знати існуючі значення розрахункового струму та коефіцієнта потужності КЛ. Але виміряти ці величини безпосередньо неможливо, оскільки реальне навантаження КЛ змінюється в часі, а розрахунковий струм згідно [6] є умовно незмінною величиною, еквівалентною за максимальною температурою її нагрівання.

Нормативний документ [6] регламентує визначення розрахункових навантажень елементів електропостачальних систем на стадії їх проектування. У роботі [8] авторами було показано, що використовувати нормативні методи прогнозування розрахункових навантажень у процесі експлуатації ЕПС недоцільно. У цій роботі автори запропонували математичні та комп'ютерні моделі визначення існуючих розрахункових навантажень у діючих електропостачальних системах за експериментальними даними, отриманими із допомогою електронного лічильника електроенергії за період часу не менший за тривалість максимально завантаженої зміни роботи споживача електроенергії. При цьому враховується постійна нагрівання елемента ЕПС, по якому передається це навантаження. Використовуючи ці моделі, можна знайти розрахунковий струм та коефіцієнт потужності для будь-якого елемента ЕПС за результатами дискретних даних вимірювань активної та реактивної потужності із заданим періодом інтеграції електронного лічильника.

На рисунку 1 показана комп'ютерна модель визначення запасу пропускної здатності кабельної лінії за отриманими таким чином параметрами  $I_{\text{р}}$  та  $\cos(\varphi)$  для однієї із КЛ 10 кВ Северинівського цегельного заводу.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	<b>Визначення запасу пропускної здатності КЛ</b>										
2	<b>Параметри КЛ</b>										
3	Переріз КЛ, мм <sup>2</sup>									F <sub>кл</sub> = 50	
4	Активний питомий опір КЛ, Ом/км									R <sub>о</sub> = 0,62	
5	Реактивний питомий опір КЛ, Ом/км									X <sub>о</sub> = 0,09	
6	Допустимий струм КЛ за ПУЕ, А									I <sub>доп</sub> = 140	
7	Довжина лінії, км									L = 3,1	
8	<b>Дані нормального режиму</b>										
9	Напруга, кВ									U = 10	
10	Повна розрахункова потужність, кВА									S <sub>p</sub> = 1050,0	
11	Розрахунковий струм КЛ, А									I <sub>p</sub> = 60,6	
12	Коефіцієнт потужності									CosF = 0,88	
13	Активна розрахункова потужність, кВт									P <sub>p</sub> = 924,0	
14	Реактивна розрахункова потужність, квар									Q <sub>p</sub> = 498,7	
15	Коефіцієнт допустимого навантаження									K <sub>доп</sub> = 0,9	
16	Допустима втрата напруги в КЛ, %									dU <sub>доп</sub> = 5	
17	<b>Дані аварійного режиму</b>										
18	Струм к.з. на початку лінії, кА									I <sub>кз</sub> = 3,200	
19	Приведений час к.з., с									t <sub>p</sub> = 1,5	
20	Тепловий коефіцієнт C, (А*с <sup>1/2</sup> )/мм <sup>2</sup>									C = 90	
21	Мінімальний переріз лінії за умовою к.з., мм <sup>2</sup>									F <sub>кз</sub> = 43,55	
22	<b>Дані післяаварійного режиму</b>										
23	Коефіцієнт збільшення навантаження в п.а. режимі									K <sub>зна</sub> = 1,9	
24	Макс. допустимий коефіцієнт навантаження в п.а. режимі									K <sub>па</sub> = 1,1	
25	Частка навантаження у п.а. режимі									K <sub>нна</sub> = 0,8	
26	Допустима втрата напруги в КЛ, %									dU <sub>падоп</sub> = 5	
27	Запас пропускної здатності, кВА, кВт, квар, А:										
28	S <sub>з</sub> = 529,4			P <sub>з</sub> = 465,8			Q <sub>з</sub> = 251,4			I <sub>з</sub> = 30,6	
29											
30	<b>Виконання обмежень</b>										
31	<b>Активні обмеження</b>										
32	$I_p + I_z \leq K_{доп} \cdot I_{доп}$						Допустимість нагрівання в н.р.				
33	91,18 ≤ 126						ДОП.				
34	$K_z \cdot (I_p + I_z) \cdot k_{нна} \leq K_{па} \cdot K_{доп} \cdot I_{доп}$						Допустимість нагрівання в п.а.р.				
35	138,60 ≤ 138,60						v ДОП.				
36	$dU_n \% \leq dU_{доп}$						Допустимість втрат напруги в н.р.				
37	2,88 ≤ 5						ДОП.				
38	$dU_{па} \% \leq dU_{падоп}$						Допустимість втрат напруги в п.а.р.				
39	4,38 ≤ 5						ДОП.				
40	<b>Пасивні обмеження</b>										
41	$F_{кз} \leq F_{кл}$						Допустимість термічної дії С.К.З.				
42	43,5 ≤ 50						ДОП.				
43	<b>Точність фіксації обмежень: 0,50%</b>										

Рис. 1. Комп'ютерна модель визначення запасу пропускної здатності КЛ

Комп'ютерну модель створено на робочому листі електронного процесора Excel у вигляді електронної таблиці і містить вихідні дані та результати розрахунку, отримані за допомогою вбудованого в Excel засобу "Пошук розв'язку" із використанням методу лінійного програмування, реалізованого в цьому засобі. У комірках електронної таблиці також використано формули, що показані в таблиці 1. Для зручності аналізу результатів розв'язку задачі у стовпці G автоматично фіксуються умови, які обмежили значення параметру S<sub>з</sub>. Точність фіксації обмежень задається в комірці K43.

Якщо КЛ не задовольняє пасивному обмеженню, або хоча б одному активному обмеженню при  $S_3 = 0$ , то в комірці В29 автоматично з'являється повідомлення: "Існуючий переріз КЛ НЕ задовольняє обмеженням.  $S_3 = 0!$ ".

Таблиця 1.

**Формули електронної таблиці комп'ютерної моделі визначення запасу пропускної здатності КЛ**

Комірки	Формули робочого листа Excel
K11	=Sp/КОРЕНЬ(3)/U
K13	=Sp*cosF
K14	=Sp*SIN(ACOS(CosF))
K21	=Ikз*КОРЕНЬ(tn)*1000/C
F28	=S3*cosF
I28	=S3*SIN(ACOS(CosF))
K28	=S3/КОРЕНЬ(3)/U
B29	=ЕСЛИ(И(Н33="ДОП."; Н35="ДОП."; Н37="ДОП."; Н39="ДОП."; Н42="ДОП."); "";"Існуючий переріз КЛ НЕ задовольняє обмеженням. $S_3 = 0!$ ")
C33	=Ip+Iз
E33	=ЕСЛИ(ИЛИ(Кдоп = "";"Ідоп = ""); "";"Кдоп*Ідоп)
H33	=ЕСЛИ(С33 <= Е33 + С33*\$K\$43;"ДОП."; "НЕ ДОП.")
C35	=ЕСЛИ(Кз > 1; Кз*(Ip+Iз)*кппа; 0)
E35	= Кпа*Кдоп*Ідоп
H35	=ЕСЛИ(С33 <= Е33 + С33*\$K\$43;"ДОП."; "НЕ ДОП.")
C37	=ЕСЛИ(U = "";""; (Ro*(Pp+Pз)+Xo*(Qp+Qз))*L/10/U^2)
E37	=dUндоп
H37	=ЕСЛИ(С35 <= Е35 + С35*\$K\$43;"ДОП."; "НЕ ДОП.")
C39	= ЕСЛИ(Кз > 1; dUн*Кз*кппа; 0)
E39	=dUпадоп
H39	=ЕСЛИ(С39 <= Е39 + С39*\$K\$43;"ДОП."; "НЕ ДОП.")
C42	=Fкз
E42	=Fкл
H42	=ЕСЛИ(С42 <= Е42 + С42*\$K\$43;"ДОП."; "НЕ ДОП.")
G33	=ЕСЛИ(И(С33 <= Е33 + С33*\$K\$43; С33 >= Е33 - С33*\$K\$43); "v"; "")
G35	=ЕСЛИ(И(С35 <= Е35 + С35*\$K\$43; С35 >= Е35 - С35*\$K\$43); "v"; "")
G37	=ЕСЛИ(И(С37 <= Е37 + С37*\$K\$43; С37 >= Е37 - С37*\$K\$43); "v"; "")
G39	=ЕСЛИ(И(С39 <= Е39 + С39*\$K\$43; С39 >= Е39 - С39*\$K\$43); "v"; "")
G42	=ЕСЛИ(И(С42 <= Е42 + С42*\$K\$43; С42 >= Е42 - С42*\$K\$43); "v"; "")

### Висновки

У роботі формалізовано поняття запасу пропускної здатності силового елемента електропостачальної системи із урахуванням усіх умов допустимої експлуатації цього елемента. Запропоновано математичну та комп'ютерну моделі процесів визначення запасу пропускної здатності кабельних ліній, придатні до використання в умовах розширення виробництва, модернізації технологічних процесів та підключення нових споживачів електроенергії до існуючої електромережі. Працездатність запропонованих моделей перевірена на реальних даних існуючої системи електропостачання при вирішенні питання про допустимість підключення додаткових навантажень до існуючої КЛ 10 кВ.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Временные руководящие указания по определению электрических нагрузок промышленных предприятий. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 27 с.
2. Погребняк Н. Н. Совершенствование методов определения расчетных нагрузок по нагреву / Н. Н. Погребняк // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 5-Донецк: ДонГТУ. – 2000. – С. 146 – 149.
3. Совершенствование методов расчета электрических нагрузок [Электронный ресурс] / Куренный Э. Г., Дмитриева Е. Н., Погребняк Н. Н., Башков В. М. –

Режим доступа: [http://masters.donntu.edu.ua/2006/eltf/belyaev/library/ist\\_2.htm](http://masters.donntu.edu.ua/2006/eltf/belyaev/library/ist_2.htm).

4. Нестеренко И. С. Методы расчета нагрузок промышленных электрических сетей / И. С. Нестеренко // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 11. – Донецк: ДонГТУ. – 2006. – С. 521 – 527.
5. Кудрин Б. И. Электроснабжение, инвестиционное проектирование и закрытие проблемы расчёта электрических нагрузок / Б. И. Кудрин, С. А. Цырук. // Электрика. – 2006. – № 4. – С. 3 – 11.
6. Инструктивные и информативные материалы по проектированию электротехнических промышленных установок. Указания по расчету электрических нагрузок: РТМ 36.18.32.4-92. – [Чинний з 01.01.93]. – М.: ВНИПИ Тяжпромэлектропроект. – 9 с.
7. Правила устройства электроустановок. – Харьков: Изд-во “Форт”, 2009. – 704 с.
8. Камінський В. В. Комп'ютерні моделі визначення розрахункових навантажень за експериментальними даними / В. В. Камінський, А. В. Камінський // Вісник ВПІ. – 2010. – №1. – С. 47 – 51.

**Камінський Андрій В'ячеславович** – к. т. н., доцент кафедри моделювання та моніторингу складних систем.

**Камінський В'ячеслав Вікторович** – к. т. н., доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.