

Я. С. БЕДЕРАК, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, С. В. ШВЕЦЬ, О. В. ЯНЧИК

РОБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НИЗЬКІЙ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Розглядаються зміни якісних параметрів електропостачання з точки зору пов'язаності рівня напруги, її перепадів і нерівномірності (провалів) із активною і реактивною потужностями. В роботі розглядаються статичні характеристики навантаження у вигляді поліномів другого порядку в залежності від напруги. Авторами використовуються регулюючі ефекти активного та реактивного навантаження відповідно до напруги, що показують на скільки відсотків змінюється вихідна потужність при відхиленні напруги. Авторами приймається обмеження на величину втрат потужності у споживача, що перерахована у регулюючих ефектах навантаження. Таким чином задається і діапазон зменшення напруги для промислового навантаження. За умови, що в електричних системах застосовуються пристрої компенсації реактивної потужності, призначені, насамперед, для розвантаження мереж від реактивних струмів, в результаті виконання компенсації реактивної потужності може дати негативний ефект збільшення сумарного електроспоживання. Основна мета статті – показати можливість мінімізації втрат активної і реактивної потужності у трансформаторах з регулюванням рівня напруги в мережі. Втрати потужності в силовому трансформаторі складаються із втрат холостого ходу та навантажувальних втрат. Втрати холостого ходу обумовлені втратами сталі від вихрових струмів і втратами на гістерезис. Втрати навантаження в трансформаторі пропорційні квадрату струму навантаження. В статті визначається оптимальна напруга на вході трансформатора, при якій сумарні втрати активної потужності трансформатора будуть мінімальними. Аналітично визначено втрати потужності залежно від відносного рівня напруги через прирівнення похідної втрат за напругою до нуля. Таким чином отримано співвідношення мінімізації втрат електроенергії у трансформаторі по середньому рівню напруги на вході трансформатора, який відповідає мінімуму втрат електроенергії в трансформаторі при змінному навантаженні.

Ключові слова: електрична енергія, показники якості електроенергії, перепади напруги, регулюючі ефекти активного та реактивного навантаження, втрата потужності, втрати енергії в трансформаторі.

Я. С. БЕДЕРАК, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, С. В. ШВЕЦЬ, А. В. ЯНЧИК

РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НИЗКОМ КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Рассматриваются изменения качественных параметров электроснабжения с точки зрения связанности уровня напряжения, его перепадов и неравномерности (провалов) с активной и реактивной мощностями. В работе рассматриваются статические характеристики нагрузки в виде полинома второго порядка в зависимости от напряжения. Авторами используются регулирующие эффекты активной и реактивной нагрузки в соответствии с напряжением, показывающим на сколько процентов изменяется выходная мощность при отклонении напряжения. Авторами принимается ограничение на величину потерь мощности у потребителя, что пересчитано в регулирующих эффектах нагрузки. Таким образом, задается и диапазон уменьшения напряжения для промышленной нагрузки. При условии, что в электрических системах применяемые устройства компенсации реактивной мощности предназначены, прежде всего, для разгрузки сетей от реактивных токов, в результате выполнения компенсации реактивной мощности может появиться отрицательный эффект увеличения суммарного электропотребления. Основная цель статьи – показать возможность минимизации потерь активной и реактивной мощности в трансформаторах с регулированием уровня напряжения в сети. Потери мощности в силовом трансформаторе состоят из потерь холостого хода и потерь под нагрузкой. Потери холостого хода обусловлены потерями стали от вихревых токов и потерями на гистерезис. Потери под нагрузкой в трансформаторе пропорциональны квадрату тока нагрузки. В статье определяется оптимальное напряжение на входе трансформатора, при котором суммарные потери активной мощности трансформатора будут минимальными. Аналитически определены потери мощности в зависимости от относительного уровня напряжения из-за приравнивания производной потерь по напряжению к нулю. Таким образом, получено соотношение минимизации потерь электроэнергии в трансформаторе по среднему уровню напряжения на входе трансформатора, который соответствует минимуму потерь электроэнергии в трансформаторе при переменной нагрузке.

Ключевые слова: электрическая энергия, показатели качества электроэнергии, перепады напряжения, регулирующие эффекты активной и реактивной нагрузки, потеря мощности, потери энергии в трансформаторе.

Y. S. BEDERAK, O. G. GRIB, I. T. KARPALIUK, S. V. SHVETS, A. V. YANCHYK

OPERATION OF THE TRANSFORMER AT LOW POWER QUALITY

Changes in the quality parameters of power supply are considered from the point of view of the connectedness of the voltage level of its drops and unevenness (dips) with active and reactive power. The paper considers the static characteristics of the load in the form of a second-order polynomial depending on the voltage. The authors use the regulating effects of active and reactive loads in accordance with the voltage, showing the percentage of the output power changes when the voltage deviates. The authors accept the limitation on the amount of power losses at the consumer, which is recalculated in the regulating effects of the load. Thus, the voltage reduction range for the industrial load is also set. Provided that the reactive power compensation devices used in electrical systems are intended primarily for unloading networks from reactive currents, as a result of reactive power compensation, a negative effect of increasing the total power consumption may appear. The main goal of the article is to show the possibility of minimizing the losses of active and reactive power in transformers with regulation of the voltage level in the network. Power losses in a power transformer consist of no-load losses and load losses. No-load losses are due to eddy current losses of steel and hysteresis losses. Load losses in a transformer are proportional to the square of the load current. The article determines the optimal voltage at the input of the transformer, at which the total losses of the active power of the transformer will be minimal. Power losses are analytically determined as a function of the relative voltage level due to equating the derivative of voltage losses to zero. Thus, the ratio of minimizing electricity losses in the transformer at the average voltage level at the input of the transformer, which corresponds to the minimum energy losses in the transformer at variable load, has been obtained.

Keywords: electrical energy, power quality indicators, voltage drops, regulating effects of active and reactive load, power loss, energy losses in a transformer.

Постановка проблеми. Електрична енергія з моменту її відкриття у вигляді електричного поля використовується людством в різних видах. І найбільш масове її використання пов'язане передусім з можливістю передачі механічної енергії на великі відстані. Можливості генерації великих потужностей в сукупності із зручностями передачі електричної енергії на великі відстані привела до великої розгалуженості дротяних мереж. Силові мережі ускладнюються і ускладнюється їх система управління. Причому при управлінні систем тепер неодмінно дотримуються умови надійності електропостачання. Але не лише надійність електричних мереж стає важливою додатковою умовою електропостачання.

Слід зазначити, що електрична енергія нині в не меншій мірі виступає в ролі товару. І як будь-який товар підкоряється умовам економічного ринку, а це в першу чергу якість товару. З часом до якості цього специфічного товару стало пред'являтися все більше вимог. Так на початку 20 століття вимоги до якості визначалося рівнем напруги в електричній мережі. Споживчі прилади в основному склалися з освітлювальних ламп розжарювання, відповідно продукт роботи цих ламп – це світло, яке на пряму залежало від величини напруги в електричній мережі. А в міському масштабі споживання електричною енергією було пов'язано з трамваями на електричній тязі, електричним вуличним освітленням і телефонним зв'язком [1]. Відповідно і були висунені вимоги до якості електричної енергії, що постачалася [2–4].

Аналіз параметрів електротехнічного комплексу на відповідність якості електричної енергії на відповідному рівні у споживача. Відомі факти зростання потужності навантажень і відповідно електроспоживання зі збільшенням напруги (порівняно з 1 % зростання електроспоживання на 1 % зростання напруги) [5, 6]. Тому споживачам небайдуже, за яких рівнів напруги працює їх система електропостачання. Найчастіше можливе зниження напруги хоча б 1÷3 % з досягненням відповідного зменшення оплати електроенергії майже додаткових матеріальних витрат [7]. Важливо при цьому відзначити, що на практиці неодноразово підтверджувалася здатність споживачів електроенергії з належною якістю виконувати всі заплановані роботи при значеннях напруги, що перебувають у дозволеному ГОСТ 13109-97 [2] діапазоні $\pm 10\%$ от $U_{ном}$.

У програмних комплексах, що повсюдно використовуються, для розрахунку встановлених режимів енергосистем навантаження можуть відобразитися статичними характеристиками навантаження (СХН) у вигляді поліномів другого порядку від напруги $U = U_0 + \Delta U$:

$$P = P_0 \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_0} + a_2 \frac{U^2}{U_0^2} \right);$$

$$Q = Q_0 \left(b_0 + b_1 \frac{U}{U_0} + b_2 \frac{U^2}{U_0^2} \right).$$

Індексом «0» позначені напруги та потужності в деякому вихідному, що вважається нормальному режимі, а коефіцієнти a і b підбираються за умов $a_0 + a_1 + a_2 = b_0 + b_1 + b_2 = 1$. Подібні СХН зазвичай розраховуються на діапазон зміни напруги до $\pm 20\%$ від U_0 .

У аналізованих нами нормальних, придатних для експлуатації режимах [7, 8], що встановилися, досить достовірно відтворити залежності навантажень від напруги при їх зміні в межах допустимих за ГОСТ відхилень напруги $\delta U = \Delta U / U_0 = \pm 10\%$. У цьому діапазоні залежності можна лінеаризувати, вважаючи $a_2 = b_2 = 0$. Після введення позначень $a_1 = K_P$, $b_1 = K_Q$, $a_0 = 1 - K_P$, $b_0 = 1 - K_Q$ потужності активної P та реактивної Q навантажень можуть бути записані у спрощеному вигляді, придатному для розрахунків як за програмами для персонального комп'ютера (ПК), так і в ручних оціночних розрахунках:

$$P = P_0(1 + K_P \cdot \delta U);$$

$$Q = Q_0(1 + K_Q \cdot \delta U).$$

Безрозмірні коефіцієнти K_P і K_Q часто називають регулюючими ефектами активного та реактивного навантаження відповідно до напруги. Вони показують, на скільки відсотків збільшилася (зменшилася) вихідна потужність при відхиленні напруги δU на $\pm 1\%$:

$$K_P = \frac{\Delta P / P_0}{\Delta U / U_0};$$

$$K_Q = \frac{\Delta Q / Q_0}{\Delta U / U_0}.$$

За аналогією до коефіцієнтів K_P і K_Q можна вести в розгляд і залежну від усередненої напруги спожиту за контрольний проміжок часу активну енергію W_P та її регулюючий ефект K_{WP} :

$$W_P = W_{P0}(1 + K_{WP} \cdot \delta U);$$

$$K_{WP} = \frac{\Delta W_P / W_{P0}}{\Delta U / U_0}.$$

Коефіцієнт K_{WP} співмірний за величиною із середнім за робочий тиждень коефіцієнтом K_P .

Наявна інформація про коефіцієнти K_P та K_{WP} для різних типів навантаження свідчить про найбільш ймовірний діапазон їх зміни в межах від 0 до 2,5.

Близькі до нуля регулюючі ефекти K_P відносяться до промислових систем електропостачання з потужними синхронними та асинхронними двигунами. Підвищені коефіцієнти характерні для режимів навантажень, для рухового, побутового, офісного та нагрівального навантажень на стороні 0,4 кВ.

Видається обґрунтованим прийняття в оціночних розрахунках величини можливої економії витрати електроенергії для промислового навантаження не менше 0,5 % на 1% зменшення напруги ($K_{WP} \geq 0,5$) та $K_{WP} \geq 1,0$ для іншого навантаження. При перебудові карт напруги у вузлах системи електропостачання з його зниженням хоча б $\delta U = 3\%$, що є можливим для переважної більшості мереж, споживач навіть при

мінімальному $K_{WP} = 0,5$ без додаткових витрат зменшить споживання електроенергії на величину

$$\Delta W_{P=} K_{WP} \delta U \cdot W_{P0} \geq 0,5 \cdot 0,03 \cdot W_{P0},$$

складову частку 1,5 % від споживаної енергії W_{P0} .

Таким чином, навіть короткочасне, на кілька годин, зниження напруги на велику величину (5–10 %) у години максимального режиму енергосистеми дозволить значно (не менше ніж на 2,5–5 %) зменшити активну потужність навантаження та, можливо, уникнути штрафів за перевищення заявленої договірної потужності навантаження. Реактивна потужність Q завантаження і набагато більшою мірою, ніж активна, залежить від напруги.

Для окремих електроприймачів без урахування встановлених у мережах компенсуючих пристроїв, що виробляють ємнісну потужність, що має негативний знак Q_{KV} , фіксується регулюючий ефект $K_Q = 2 \div 6$ [1, 9].

Оскільки у складі навантажень можуть бути реактивні навантаження Q_{KV} ємнісного характеру, що мають негативний знак, сумарна потужність Q_{Σ} при наближенні до 100 % компенсації реактивної потужності стає близькою до нуля. При цьому виникають ефекти різкого зростання числових значень $K_{Q\Sigma}$ і навіть зміна знаку $K_{Q\Sigma}$ у разі перекомпенсації реактивної потужності.

Повсюдно застосовувані заходи з компенсації реактивної потужності призначені насамперед для розвантаження мереж від реактивних струмів та зменшення цим активних навантажувальних втрат потужності. Практика показує велику ефективність компенсації реактивної потужності: втрати зменшуються майже на 30 % та можлива окупність витрат на компенсації реактивної потужності за рахунок зменшення оплати електроенергії.

Але впроваджувати пристрої компенсації реактивної потужності потрібно тільки при обов'язковому виконанні правила повернення підвищеного після компенсації реактивної потужності конденсаторами напруги до вихідного рівня. А оскільки таке цілеспрямоване регулювання практично не завжди здійснюється, є ймовірність зростання активного навантаження відповідно до її СХН навіть на величину, що перевищує зниження втрат під дією компенсації реактивної потужності. В результаті виконання компенсації реактивної потужності може дати негативний ефект збільшення сумарного оплачуваного електроспоживання [1].

Мінімізація втрат активної потужності у трансформаторах з регулюванням рівня напруги в мережі. Втрати потужності в силовому трансформаторі складаються із втрат холостого ходу та навантажувальних втрат. Втрати холостого ходу обумовлені втратами сталі від вихрових струмів і втратами на гістерезис. Втрати сталі пропорційні квадрату наведеної електрорушійної сили, яка приблизно дорівнює напрузі на висновках первинної обмотки трансформатора, так як втратами напруги в первинному ланцюгу трансформатора можна знехтувати. Втрати навантаження в трансформаторі

пропорційні квадрату струму навантаження. Зменшити ці втрати можна, підвищивши напругу живлення або зменшивши потужність навантаження трансформатора, наприклад шляхом компенсації реактивної потужності [10]. Але при цьому одночасно збільшаться втрати в сталі та реактивна потужність намагнічування трансформатора. [9, 11].

Доцільно визначити оптимальну напругу на вході трансформатора, при якому сумарні втрати активної потужності трансформатора будуть мінімальними. Виразивши втрати потужності залежно від відносного рівня напруги U_* і прорівнявши похідну втрат за напругою до нуля, можна отримати простий аналітичний вираз для визначення оптимальної напруги:

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P_X U_*^2 + \frac{1}{U_*^2} \Delta P_K K_3^2; \\ \frac{d\Delta P_T}{dU_*} &= 2\Delta P_X U_* - \frac{2}{U_*^3} \Delta P_K K_3^2 = 0; \\ U_{*opt} &= \sqrt[4]{\frac{\Delta P_K K_3^2}{\Delta P_X}}, \end{aligned}$$

де ΔP_X та ΔP_K – паспортні значення втрат активної потужності холостого ходу та короткого замикання трансформатора відповідно;

U_* – відносне значення напруги на вході трансформатора, що дорівнює відношенню фактичної напруги на вході до номінальної напруги його первинної обмотки;

$K_3 = S_2/S_{ном}$ – коефіцієнт завантаження трансформатора;

S_2 – потужність навантаження трансформатора;

$S_{ном}$ – номінальна потужність трансформатора.

Оптимальне напруження на вході трансформатора зі збільшенням його навантаження потрібно підвищувати. Враховуючи технічні обмеження за величиною допустимих відхилень напруги, оптимальна напруга U_{opt} для заданого типу трансформатора відповідає навантаженню трансформатора в діапазоні 40–55 % його номінальної потужності. При великих навантаженнях потрібно на вході трансформатора підтримувати максимально допустимий рівень напруги за умови роботи ізоляції, а при менших – мінімально допустимий рівень за умови забезпечення необхідної якості електроенергії у споживачів [11].

Мінімізація втрат реактивної потужності у трансформаторах регулюванням рівнів напруги в мережах живлення. Необхідно оптимізувати рівень напруги на вході трансформатора, який забезпечить мінімум втрат реактивної потужності в трансформаторі. Виразивши втрати реактивної потужності залежно від відносного рівня напруги U_* і прорівнявши похідну втрат за напругою до нуля, можна отримати простий аналітичний вираз визначення втрат напруги:

$$\Delta Q_T = \Delta Q_X U_*^2 + \frac{1}{U_*^2} \Delta Q_K K_3^2;$$

$$\Delta Q_X = \frac{I_{X\%}}{100} S_{ном};$$

$$\Delta Q_K = \frac{U_{K\%}}{100} S_{ном};$$

$$U_{*opt} = \sqrt[4]{\frac{\Delta Q_K K_3^2}{\Delta Q_X}}.$$

де ΔQ_X та ΔQ_K – відповідно втрати реактивної потужності на намагнічування та втрати у реактивному опорі трансформатора при максимальному навантаженні;

I_X та I_K – відповідно струм холостого ходу та напруга короткого замикання трансформатора.

З погляду мінімізації втрат реактивної потужності оптимальні рівні напруги з урахуванням технічних обмежень можна було б підтримувати при завантаженнях трансформаторів в діапазоні 25–40 % від їх номінальної потужності. Тобто, умови мінімізації втрат активної та реактивної потужностей у трансформаторах шляхом зміни напруги на їхньому вході відрізняються, що можна пояснити різними співвідношеннями втрат холостого ходу та втрат в обмотках залежно від рівня вхідної напруги.

Мінімізація втрат електроенергії у трансформаторі. Середній рівень напруги на вході трансформатора, який відповідає мінімуму втрат електроенергії в трансформаторі при змінному навантаженні, визначається таким чином [11]:

$$\Delta W P_T = \Delta P_X U_*^2 8760 + \frac{1}{U_*^2} \Delta P_K K_{3.c}^2 \tau;$$

$$\frac{d\Delta W P_T}{dU_*} = 2\Delta P_X U_* 8760 - \frac{2}{U_*^3} \Delta P_K K_{3.c}^2 \tau = 0;$$

$$U_{opt} = \sqrt[4]{\frac{\Delta P_K K_{3.c}^2 \tau}{\Delta P_X 8760}};$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{НБ}}{10000}\right)^2 8760;$$

$$K_{3.c} = \frac{S_c}{S_{ном}}; S_c = \frac{(WP^2 + WQ^2)}{T_p},$$

де S_c – середня за заданий період потужність навантаження трансформатора;

WP , WQ – відповідно кількість спожитої за заданий період активної та реактивної електроенергії;

T_p – тривалість роботи трансформатора під навантаженням;

$K_{3.c}$ – середній коефіцієнт завантаження трансформатора за заданий період часу;

$T_{НБ}$ – час використання максимального навантаження;

τ – час найбільших втрат.

Оптимальний рівень напруги на вході трансформатора, при якому втрати електроенергії в трансформаторі при змінному навантаженні будуть мінімальними, залежить не тільки від коефіцієнта його

завантаження та технічних характеристик, а й від форми графіка електричних навантажень, зокрема часу використання максимального навантаження. Чим рівномірніший графік електричних навантажень трансформатора і чим більший коефіцієнт завантаження, тим вище має бути рівень напруги на вході трансформатора, який відповідає мінімуму втрат електроенергії в ньому.

Мінімізувати втрати електроенергії в трансформаторах заданого типу можливо, підтримуючи оптимальний рівень напруги в мережі живлення при їхньому середньому завантаженні в межах 55–100 % від номінальної потужності, залежно від форми графіків електричних навантажень, тобто при значно більших завантаженнях у порівнянні з мінімізацією сумарних втрат активної потужності у трансформаторах. Тільки у разі рівномірного навантаження протягом заданого періоду часу при $\tau = 8760$ год, умови мінімізації втрат потужності та втрат електроенергії в трансформаторі збігаються, і оптимальна напруга буде однаковою для обох випадків.

Висновки. Підтримання якісних показників електричної енергії у споживача запропоновано розглядати через нерівномірні в часі і нерівномірні в потужності втрати електричної енергії в силовому трансформаторі. Авторами показано, що втрати для активної і реактивної складової потужності можуть мати вплив на певні якісні показники електричної енергії. З іншого боку наявність неякісних показників буде призводити до збільшення втрат потужності у силовому трансформаторі. В роботі розглянуто питання досягнення мінімізації втрат потужності в силових трансформаторах через використання регулюючих ефектів активного та реактивного навантаження відповідно до напруги при змінному навантаженні.

Список літератури

1. Кучумов Л., Кузнецов А. Зависимость загрузки и потерь мощности от напряжения. Реальность повышения потребления электроэнергии. *Новости ЭлектроТехники*. 2018. № 2 (110). С. 48–53.
2. ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010. Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (ІЕС 61000-4-30:2008, ІДТ). Київ: Інститут електродинаміки Національної Академії наук України, 2010. 56 с.
3. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги в системах електропостачання загального призначення (EN 50160:2010, ІДТ). Київ: Інститут електродинаміки Національної Академії наук України, 2010. 32 с.
4. Сокол Є. І. та ін. Цифровий облік електричної енергії з урахуванням показників її якості та визначенням відповідальності за погіршення. Харків: ФОП Бровін О. В., 2021. 330 с.
5. Карташів І. І. Провали напруги. Реальність прогнозів і схемні рішення захисту. *Новости ЭлектроТехники*. 2004. № 5 (29).
6. Фишман В. Провалы напряжения в сетях промпредприятий. Причины и влияние на электрооборудование. *Новости ЭлектроТехники*. 2004. № 5 (29).
7. Бедерак Я. С., Волков В. І. Виявлення і дослідження джерел вищих гармонік «неелектричного походження» в системі електропостачання промислового підприємства. *Промислова*

електроенергетика та електротехніка» Промелектро : інформ. зб.. 2019. №1. С. 8–11.

8. Гапон Д. А., Бедерак Я. С. Особенности режима работы питающей сети во время плавного пуска мощных синхронных двигателей. *Промышленная энергетика*. 2014. №2. С. 27–30.
9. Романюк Ю. Ф., Соломчак О. В. Оптимізація рівнів напруги в електричних мережах з метою зменшення втрат потужності та енергії в трансформаторах. «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро: інформ. зб.. 2014. №6. С. 45–48.
10. Бабич В. Энергосбережение для повышения экономической эффективности предприятия. *Новости ЭлектроТехники*. 2001. № 6.
11. Романюк Ю. Ф., Соломчак О. В. Зниження втрат електроенергії в силових трансформаторах шляхом підтримання оптимальної напруги живильної мережі. *Матеріали XVIII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя*. 2014. С. 152–153.
5. Kartashev I. I. Provaly napryazheniya. Real'nost' prognozov i skhemnye resheniya zashchity [Voltage dips. Reality of predictions and protection schemes]. *Electrical Engineering News*. 2004, no. 5 (29).
6. Fishman V. Provaly napryazheniya v setyakh prompredpriyatiy. Prichiny i vliyanie na elektrooborudovanie [Voltage dips in industrial networks. Causes and effects on electrical equipment]. *Electrical Engineering News*. 2004 № 5(29).
7. Bederak Ya. S., Volkov V. I. Vyyavleniya i doslidzhennya dzhерel vyshchikh harmonik "neelektrychnoho pokhodzhennya" v systemi elektropostachannya promyslovoho pidpryyemstva [Identification and investigation of sources of higher harmonics of "non-electrical origin" in the power supply system of an industrial enterprise]. "Industrial Electricity and Electrical Engineering". *Promelectro: information bulletin*. 2019, no. 1, pp. 8–11.
8. Gapon D. A., Bederak Ya. S. Osobennosti rezhima raboty pitayushchey seti vo vremya pлавного пуска moshchnykh sinkhronnykh dvigateley [Features of mains operation during soft-start of powerful synchronous motors]. *Industrial Power Engineering*. 2014, no. 2, pp. 27–30.
9. Romanyuk Yu. F., Solomchak O. V. Optymizatsiya rivniv napruhu v elektrichnykh merzhakh z metoyu zmenshennya vtrat potuzhnosti ta enerhiyi v transformatorakh [Optimisation of voltage levels in electricity networks to reduce power and energy losses in transformers]. "Industrial Electricity and Electrical Engineering". *Promelectro: information bulletin*. 2014, no. 6, pp. 45–48.
10. Babich V. Energoberezhenie dlya povysheniya ekonomicheskoy effektivnosti predpriyatiya [Energy saving to improve the economic efficiency of a company]. *Electrical Engineering News*. 2001, no. 6.
11. Romanyuk Yu. F., Solomchak O. V. Znyzhennya vtrat elektroenerhiyi v sylovykh transformatorakh shlyakhom pidtrymannya optymal'noyi napruhu zhyvyl'noyi merezhi [Reducing power losses in power transformers by maintaining optimum supply voltage]. *Materials of XVIII scientific conference of I. Pulyu TSTU*. 2014, pp. 152–153.

References (transliterated)

1. Kuchumov L., Kuznetsov A. Zavisimost' zagruzki i poter' moshchnosti ot napryazheniya. Real'nost' povysheniya potrebleniya elektroenergi [Dependence of load and power loss on voltage. The reality of increased electricity consumption]. *Electrical Engineering News*. 2018, no. 2 (110), pp. 48–53.
2. DSTU IEC 61000-4-30:2010. *Elektromagnitna sumisnist'. Chastyna 4-30. Metody vuprobuvannya ta vymiryuvannya. Vymiryuvannya pokaznykiv yakosti elektrichnoyi enerhiyi (IEC 61000-4-30:2008, IDT)* [State Standard IEC 61000-4-30:2010. Electromagnetic comparability. Part 4-30. Test and measurement methods. Measurement of electrical energy quality parameters]. Kyiv, NASU Institute of Electrodynamics Publ., 2010. 56 p.
3. DSTU EN 50160:2014. *Kharakterystyky napryazheniya v systemakh elektrosnabzheniya obshchego naznachennya (EN 50160:2010, IDT)* [State Standard EN 50160:2014. Voltage characteristics in electricity supply systems.]. Kyiv, NASU Institute of Electrodynamics Publ., 2010. 32 p.
4. Sokol Ye. I. et al. Tsyfrovyi oblik elektrichnoyi enerhiyi z urakhuvannyam pokaznykiv yiyi yakosti ta vyznachennyam vidpovidal'nosti za pohirshennya [Digital metering of electricity,

Hadziusha (received) 30.11.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бедерак Ярослав Семенович (Бедерак Ярослав Семенович, Yaroslav Bederak) – кандидат технічних наук, Приватне акціонерне товариство «АЗОТ», керівник лабораторії, м. Черкаси, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-0965>; e-mail: yaroslav0768@gmail.com.

Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Oleg Gryb) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4758-8350>. e-mail: oleg47gryb@gmail.com.

Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Ігорь Тимофеевич, Igor Karpaliuk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5634-6807>. e-mail: humpway@gmail.com.

Швец Сергій Вікторович (Швец Сергей Викторович, Sergey Shvets) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3716-141X>. e-mail: se55sh32@gmail.com.

Янчик Олександр Григорович (Янчик Александр Григорьевич, Alexander Yanchuk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра безпеки праці та навколишнього середовища, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1214-4883>. e-mail: yanchik@ukr.net.