

О. Г. ГРИБ, Т. С. ДОНЕЦКАЯ, С. В. ШВЕЦ, А. В. БОРТНИКОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСТРЕМУМОВ МОЩНОСТИ И ПОТЕРЬ В ОТДЕЛЬНОЙ ФАЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Сформульовано та вирішено задачу пошуку екстремумів потужності в залежності від характеру струму при заданій формі напруги і абсолютного екстремуму функції потужності в залежності від співвідношення гармонійних складових. Отримані співвідношення для коефіцієнтів потужності і втрат на активному опорі проводів в лініях електропередач в окремій фазі електричної мережі. Співвідношення дозволяють розраховувати як миттєві, так і інтегральні оцінки якості електроспоживання.

Ключові слова: якість електричної енергії, несинусоїдальні режими, вищі гармоніки, електроспоживання, електричні мережі.

Сформулированы и решены задачи поиска экстремумов мощности в зависимости от характера тока при заданной форме напряжения и абсолютного экстремума функции мощности в зависимости от соотношения гармонических составляющих. Получены соотношения для коэффициентов мощности и потерь на активном сопротивлении проводов в линиях электропередач в отдельной фазе электрической сети. Соотношения позволяют рассчитывать, как мгновенные, так и интегральные оценки качества электропотребления.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несинусоидальные режимы, высшие гармоники, электропотребление, электрические сети.

To assess the quality of power consumption, the processes of power transfer in a separate phase in the most general case for non-sinusoidal voltage and non-sinusoidal current are considered. The problem of searching for power extremes is determined and solved depending on the nature of the current for a given voltage form, as well as determining the absolute extremum of the power function as a function of the ratio of the harmonic components. The calculated ratios for the calculation of the power and loss factors for the active resistance of wires in power lines in a separate phase of the electrical network are given. Ratios allow us to calculate both instantaneous and integral estimates of the quality of power consumption, taking into account such consumer properties as symmetry, linearity, the presence of reactivity. Analysis of the results shows that the maximum power occurs when the ratio of the current amplitudes is equal to the ratio of the voltage amplitudes. Regardless of the nature of the voltage, the possible maximum power for a fixed loss level is transferred to the load if it is a constant active resistance. In this case, the maximum possible power is equal to the product of the actual values of voltage and current. Thus, the main source of increased power losses in electrical networks is the reactivity of the consumer. The resulting relationships can be successfully applied in real devices for monitoring the quality of power consumption, as well as meters.

Keywords: quality of electrical energy, non-sinusoidal modes, higher harmonics, power consumption, electrical networks.

Введение. Энергоэффективность и качество электрической энергии являются важными составляющими при работе объединенной энергосистемы Украины с энергосистемами Евросоюза. Вопросам электропотребления и качеству электрической энергии в электрических сетях промышленных предприятий в настоящее время посвящено значительное количество публикаций [1]. Для получения информации об эффективности электропотребления необходимо создание новых технологий в автоматизации учета электрической энергии (ЭЭ) с контролем её качества [2]. Определение показателей качества ЭЭ задача не простая, так как все нормируемые показатели качества ЭЭ не могут быть измерены напрямую, т.е. их необходимо рассчитывать, а окончательное заключение можно дать только по статистически обработанным результатам. Поэтому, для определения показателей качества электрической энергии, необходимо выполнить большой объем измерений с высокой скоростью и одновременной математической и статистической обработкой измеренных значений [3]. Наибольший поток измерений необходим для определения несинусоидальности напряжения. В настоящее время из всех показателей качества ЭЭ существенное влияние на систему учета электропотребления оказывают высшие гармоники, которые создают дополнительные погрешности в каждой точке учета электропотребления в электрических сетях [4].

Анализ последних исследований и

литературы. Рассмотрение вопросов качества электрической энергии как оценки характера напряжения, ответственность за который несет исключительно электроснабжающая организация, является односторонним. Во многих случаях ухудшение параметров качества электроэнергетики является следствием работы какого-либо электроприемника [5, 6]. Проблема усугубляется тем, что в настоящее время наблюдается тенденция активного внедрения новых преобразовательных устройств, создающих новые виды искажений и приводящих к ранее неизвестным проблемам электромагнитной совместимости. Существующий математический аппарат не позволяет корректно оценивать весь спектр возможных искажений и их комбинаций [7, 8, 9]. Таким образом, целесообразна разработка универсального математического аппарата, позволяющего получить оценку влияния того или иного потребителя на качество электрической энергии независимо от режима работы электрической сети.

Цель статьи. Нахождение максимума мощности, которую можно передать потребителю при заданном характере напряжения и уровне потерь на активном сопротивлении проводов в линиях электропередач в отдельной фазе электрической сети, а также минимума потерь при заданном характере напряжения и уровне потребляемой мощности – с помощью коэффициента потерь.

Постановка проблемы. В современных условиях возникает необходимость в наличии соотношений для учета таких свойств потребителя как

симметрия, линейность, наличие реактивности. Данные соотношения должны быть использованы для расчета как мгновенных, так и интегральных оценок качества электропотребления в трехфазной трехпроводной и четырехпроводной сетях.

В основе решения указанной задачи лежит поиск экстремумов мгновенной и средней мощности, а также потерь на активном сопротивлении проводов линий электропередач в отдельной фазе электрической сети. Решение данной задачи позволит сформировать требования к идеальному потребителю в трехпроводной электрической сети независимо от симметрии и гармонического состава питающего напряжения.

Материалы исследований. Рассмотрим процессы передачи мощности в отдельной фазе в наиболее общем случае при несинусоидальном напряжении и несинусоидальном токе.

Для оценки качества электропотребления целесообразны две возможных постановки задачи. Первую задачу можно сформулировать, как нахождение максимума мощности, которую можно передать потребителю при заданном характере напряжения и заданном уровне потерь на активном сопротивлении проводов линии электропередач. В этом случае, для оценки качества электропотребления можно использовать коэффициент мощности, полученный как:

$$PF = \frac{P}{P_{\max}} \leq 1, \quad (1)$$

где $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$ – средняя

потребляемая мощность на интервале T ;

P_{\max} – максимально возможная мощность при заданном напряжении и уровне потерь;

$p(t)$ – мгновенное значение активной мощности;

$u(t)$, $i(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока.

Вторая задача является обратной и сводится к поиску минимума потерь при заданном характере напряжения и уровне потребляемой мощности. Тогда оценкой качества потребления может являться коэффициент потерь:

$$LF = \frac{P_L}{P_{Li}} \geq 1, \quad (2)$$

где P_L – величина потерь на активном сопротивлении проводов;

P_{Li} – величина потерь в «идеальном» случае, т.е. минимально возможные потери для передачи заданного уровня активной мощности при известном характере напряжения.

Потери на активном сопротивлении проводников r можно описать как:

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T p_L(t) dt = \int_0^T r i^2(t) dt = r I_{RMS}^2, \quad (3)$$

где $I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$ – действующее значение тока

на интервале T ;

r – активное сопротивление проводов линий электропередач.

Величины r , a , следовательно, и P_L – неизвестны, но для решения поставленной задачи достаточно зафиксировать I_{RMS} – действующее значение тока.

Для определения экстремумов мощности, в зависимости от характера тока при заданной форме напряжения, выполним разложение в ряд Фурье мгновенных значений напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$:

$$u(t) = \sum_{k=0}^{\infty} U_{m,k} \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (4)$$

$$i(t) = \sum_{h=0}^{\infty} I_{m,h} \sin(h\omega t + \psi_h), \quad (5)$$

где $U_{m,k}$, $I_{m,h}$, φ_k , ψ_h – амплитудные значения и фазы соответствующих гармоник напряжения и тока.

Разложив синус суммы углов, получим:

$$u(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (U_{s,k} \sin(k\omega t) + U_{c,k} \cos(k\omega t)), \quad (6)$$

$$i(t) = \sum_{h=0}^{\infty} (I_{s,h} \sin(h\omega t) + I_{c,h} \cos(h\omega t)), \quad (7)$$

где $U_{s,k} = U_{m,k} \cos(\varphi_k)$, $U_{c,k} = U_{m,k} \sin(\varphi_k)$,

$I_{s,h} = I_{m,h} \cos(\psi_h)$, $I_{c,h} = I_{m,h} \sin(\psi_h)$.

Тогда

$$p(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{h=0}^{\infty} \{ (U_{s,k} \sin(k\omega t) + U_{c,k} \cos(k\omega t)) \times (I_{s,h} \sin(h\omega t) + I_{c,h} \cos(h\omega t)) \}. \quad (8)$$

Интеграл от полученной мгновенной мощности можно представить в виде двух составляющих:

$$\int p(t) dt = A(t) + B(t), \quad (9)$$

где первое слагаемое описывает мощность, получаемую от несоответствующих гармоник тока и напряжения:

$$A(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{h=0, h \neq k}^{\infty} (A_1 - A_2 - A_3 + A_4). \quad (10)$$

В выражении (10):

$$A_1 = \frac{\sin(h\omega t) \cos(k\omega t) \cdot (I_{s,h} U_{s,k} k + I_{c,h} U_{c,k} h)}{\omega(h^2 - k^2)}; \quad (11)$$

$$A_2 = \frac{\cos(h\omega t)\cos(k\omega t) \cdot (I_{s,h}U_{c,k}h - I_{c,h}U_{s,k}k)}{\omega(h^2 - k^2)}; \quad (12)$$

$$A_3 = \frac{\cos(h\omega t)\sin(k\omega t) \cdot (I_{s,h}U_{s,k}h + I_{c,h}U_{c,k}k)}{\omega(h^2 - k^2)}; \quad (13)$$

$$A_4 = \frac{\sin(h\omega t)\sin(k\omega t) \cdot (I_{c,h}U_{s,k}h - I_{s,h}U_{c,k}k)}{\omega(h^2 - k^2)}; \quad (14)$$

для $h \neq k$.

Второе слагаемое описывает мощность соответствующих гармоник тока и напряжения

$$B(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(B_1 + \frac{B_2 + B_3 + B_4}{k\omega \left[\tan^4\left(\frac{k\omega t}{2}\right) + 2\tan^2\left(\frac{k\omega t}{2}\right) + 1 \right]} \right); \quad (15)$$

где

$$B_1 = \frac{I_{c,k}U_{c,k} + I_{s,k}U_{s,k}}{2} t; \quad (16)$$

$$B_2 = (I_{s,k}U_{s,k} - I_{c,k}U_{c,k}) \tan^3\left(\frac{k\omega t}{2}\right); \quad (17)$$

$$B_3 = 2(I_{c,k}U_{s,k} + I_{s,k}U_{c,k}) \tan^2\left(\frac{k\omega t}{2}\right); \quad (18)$$

$$B_4 = (I_{c,k}U_{c,k} - I_{s,k}U_{s,k}) \tan\left(\frac{k\omega t}{2}\right); \quad (19)$$

для $h = k$.

После подстановки диапазона $0..2\pi n/\omega$ в (10) и (15), где n – любое целое число, получим:

$$A(t) \Big|_0^{2\pi n/\omega} = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{h=0, h \neq k}^{\infty} \left(\frac{A_5}{\omega(h^2 - k^2)} - \frac{A_6}{\omega(h^2 - k^2)} + \frac{A_7}{\omega(h^2 - k^2)} - \frac{A_8}{\omega(h^2 - k^2)} \right); \quad (20)$$

где

$$A_5 = I_{c,h}U_{s,k} (k(\cos(2\pi hn)\cos(2\pi kn) - 1) + h\sin(2\pi hn)\sin(2\pi kn)); \quad (21)$$

$$A_6 = I_{s,h}U_{c,k} (h(\cos(2\pi hn)\cos(2\pi kn) - 1) + k\sin(2\pi hn)\sin(2\pi kn)); \quad (22)$$

$$A_7 = I_{c,h}U_{c,k} (h\cos(2\pi hn)\sin(2\pi kn) - k\cos(2\pi hn)\sin(2\pi kn)); \quad (23)$$

$$A_8 = I_{s,h}U_{s,k} (h\cos(2\pi hn)\sin(2\pi kn) - k\cos(2\pi kn)\sin(2\pi hn)). \quad (24)$$

Нетрудно заметить, что при целом n все слагаемые выражения (20) обращаются в ноль, что объясняется ортогональностью кратных гармоник.

$$B(t) \Big|_0^{2\pi n/\omega} = \sum_{k=0}^{\infty} (B_5 + B_6 + B_7 - B_8), \quad (25)$$

где

$$B_5 = \frac{I_{c,k}U_{s,k}\sin^2(2\pi kn)}{2\omega k}; \quad (26)$$

$$B_6 = \frac{I_{s,k}U_{c,k}\sin^2(2\pi kn)}{2\omega k}; \quad (27)$$

$$B_7 = \frac{I_{c,k}U_{c,k}(\sin(4\pi kn) + 4\pi kn)}{4\omega k}; \quad (28)$$

$$B_8 = \frac{I_{s,k}U_{s,k}(\sin(4\pi kn) - 4\pi kn)}{4\omega k}. \quad (29)$$

Первые два слагаемых выражения (25) также обращаются в ноль, а, следовательно, результат будет иметь вид:

$$B(t) \Big|_0^{2\pi n/\omega} = \frac{\pi n}{\omega} \sum_{k=0}^{\infty} (I_{c,k}U_{c,k} + I_{s,k}U_{s,k}). \quad (30)$$

Тогда

$$\int_0^{2\pi n/\omega} p(t) dt = B(t) \Big|_0^{2\pi n/\omega} = \quad (31)$$

$$= \frac{\pi n}{\omega} \sum_{k=0}^{\infty} (I_{c,k}U_{c,k} + I_{s,k}U_{s,k}),$$

а значит, средняя мощность за любое целое число периодов равна:

$$P = \frac{1}{2\pi n/\omega} \int_0^{2\pi n/\omega} p(t) dt = \frac{\omega}{2\pi n} \frac{\pi n}{\omega} \sum_{k=0}^{\infty} (I_{c,k}U_{c,k} + I_{s,k}U_{s,k}) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (I_{c,k}U_{c,k} + I_{s,k}U_{s,k}) \quad (32)$$

Выразив синусоидальную составляющую через амплитуду гармоники и косинусоидальную составляющую, получим:

$$I_{s,k} = \sqrt{I_{m,k}^2 - I_{c,k}^2}. \quad (33)$$

Найдем экстремумы мощности k -й гармоники:

$$P_k = \frac{1}{2} (I_{c,k}U_{c,k} + I_{s,k}U_{s,k}) = \frac{1}{2} \left(I_{c,k}U_{c,k} + U_{s,k} \sqrt{I_{m,k}^2 - I_{c,k}^2} \right), \quad (34)$$

для чего продифференцируем и приравняем к нулю:

$$U_{c,k} - \frac{I_{c,k}U_{s,k}}{\sqrt{I_{m,k}^2 - I_{c,k}^2}} = 0. \quad (35)$$

Решив уравнение, получим значения для составляющих:

$$I_{c,k} = \frac{I_{m,k}U_{c,k}}{\sqrt{U_{c,k}^2 + U_{s,k}^2}} = I_{m,k} \frac{U_{c,k}}{U_{m,k}} \quad (36)$$

$$I_{s,k} = \frac{I_{m,k}U_{s,k}}{\sqrt{U_{c,k}^2 + U_{s,k}^2}} = I_{m,k} \frac{U_{s,k}}{U_{m,k}}. \quad (37)$$

Результаты исследований. Таким образом, экстремум мощности, соответствующей гармонической составляющей возникает тогда, когда косинусоидальная и синусоидальная составляющие тока пропорциональны соответствующим составляющим напряжениям, что эквивалентно совпадению угла сдвига фаз для тока и напряжения соответствующей гармоники.

Далее, для определения абсолютного экстремума функции мощности в зависимости от соотношения гармонических составляющих следует найти соотношение между амплитудами этих гармонических составляющих.

Подставив полученные выражения в (32) получим выражение для мощности:

$$P = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (I_{c,k}U_{c,k} + I_{s,k}U_{s,k}) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (I_{m,k}U_{m,k}). \quad (38)$$

А также для действующего значения тока:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi n} \int_0^{\frac{2\pi n}{\omega}} \sum_{k=0}^{\infty} I^2 dt}, \quad (39)$$

где

$$I = I_{c,k} \cos(k\omega t) + I_{s,k} \sin(k\omega t); \quad (40)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi n} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{I_{c,k}^2 \pi n k + I_{s,k}^2 \pi n k}{\omega k} \right)} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (I_{c,k}^2 + I_{s,k}^2)} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} I_{m,k}^2}. \quad (41)$$

Пусть, сигналы тока и напряжения содержат только две гармоники – первую и вторую. Тогда можно записать:

$$I_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_{m,1}^2 + I_{m,2}^2}, \quad (42)$$

$$P = \frac{1}{2} (U_{m,1}I_{m,1} + U_{m,2}I_{m,2}) \quad (43)$$

и пусть

$$I_{m,2} = K_2 I_{m,1}. \quad (44)$$

Подставив последние выражения в (42), получим:

$$2I_{RMS}^2 = I_{m,1}^2 + K_2^2 I_{m,1}^2, \quad (45)$$

из чего:

$$I_{m,1} = \sqrt{\frac{2I_{RMS}^2}{1+K_2^2}} I_{m,2} = K_2 \sqrt{\frac{2I_{RMS}^2}{1+K_2^2}}. \quad (46)$$

Тогда можно записать:

$$P = \frac{1}{2} \left(U_{m,1} \sqrt{\frac{2I_{RMS}^2}{1+K_2^2}} + U_{m,2} K_2 \sqrt{\frac{2I_{RMS}^2}{1+K_2^2}} \right). \quad (47)$$

Найдем экстремум по K_2 , для чего продифференцируем и приравняем к нулю:

$$\frac{dP}{dK_2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(U_{m,2} \sqrt{\frac{I_{RMS}^2}{1+K_2^2}} - \frac{I_{RMS}^2 U_{m,1} K_2}{(1+K_2^2)^2 \sqrt{\frac{I_{RMS}^2}{1+K_2^2}}} - \frac{I_{RMS}^2 U_{m,2} K_2^2}{(1+K_2^2)^2 \sqrt{\frac{I_{RMS}^2}{1+K_2^2}}} \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{I_{RMS}^2 (U_{m,2} - U_{m,1} K_2)}{(1+K_2^2)^2 \sqrt{\frac{I_{RMS}^2}{1+K_2^2}}} \right) = 0. \quad (48)$$

Решением чего является:

$$K_2 = \frac{U_{m,2}}{U_{m,1}}. \quad (49)$$

Подставив полученное выражение для K_2 во второе уравнение, найдем решение:

$$K_3 = \frac{U_{m,3}}{U_{m,1}}, \quad K_2 = \frac{U_{m,2}}{U_{m,1}}. \quad (50)$$

Аналогичным образом, введя коэффициенты K_4 , K_5 и решив систему уравнений с частными производными можно доказать, что при любом количестве гармоник экстремум функции мощности возникает тогда, когда амплитуды всех гармоник тока пропорциональны амплитудам соответствующих гармоник напряжений.

Коэффициент мощности, характеризующий неидеальность потребителя, может быть найден по формуле:

$$PF = \frac{P_p}{P_{\max}} = \frac{P_p}{U_{RMS} I_{RMS}} \leq 1, \quad (51)$$

где P_p – мощность потребителя.

Аналогичным образом можно решить обратную

задачу – определение минимально возможного уровня потерь при известном уровне потребленной мощности.

"Идеальный" потребитель представляет собой постоянное активное сопротивление R_i равно:

$$R_i = \frac{U_{RMS}^2}{P_p}. \quad (52)$$

Тогда действующий ток I_{RMS_i} в идеальном случае:

$$I_{RMS_i} = \frac{U_{RMS}}{R_i} = \frac{U_{RMS}}{\left(\frac{U_{RMS}^2}{P_p}\right)} = \frac{P_p}{U_{RMS}}. \quad (53)$$

А коэффициент потерь можно найти как:

$$\begin{aligned} LF &= \frac{P_L}{P_{Li}} = \frac{rI_{RMS}^2}{rI_{RMS_i}^2} = \\ &= \frac{I_{RMS}^2}{I_{RMS_i}^2} = \frac{U_{RMS}^2 I_{RMS}^2}{P_p^2} \geq 1. \end{aligned} \quad (54)$$

При этом нетрудно убедиться, что:

$$\begin{aligned} LF &= \frac{I_{RMS}^2}{I_{RMS_i}^2} = \frac{I_{RMS}^2}{\left(\frac{P_p}{U_{RMS}}\right)^2} = \\ &= \frac{I_{RMS}^2 U_{RMS}^2}{(P_{\max} PF)^2} = \frac{P_{\max}^2}{P_{\max}^2 PF^2} = \frac{1}{PF^2}. \end{aligned} \quad (55)$$

Следует отметить, что возможен случай, когда $P_p = 0$, тогда коэффициент потерь будет стремиться к бесконечности.

Выводы. Для выполнения оценки качества электропотребления были решены задачи поиска экстремумов мгновенной и средней мощности, а также потерь на активном сопротивлении проводов линий электропередач в отдельной фазе электрической сети. Из полученных соотношений можно сделать следующие выводы.

1. Максимум мощности возникает тогда, когда соотношение амплитуд токов равно соотношению амплитуд напряжений.

2. Независимо от характера напряжения возможная максимальная мощность при фиксированном уровне потерь передается в нагрузку, если она представляет собой постоянное активное сопротивление.

3. Величина максимально возможной мощности равна произведению действующих значений напряжения и тока.

Список литературы

1. Гриб О. Г. Контроль потребления электроэнергии с учетом ее

качества / О. Г. Гриб, В. И. Васильченко, В. И. Громадский. – Х.: ХНУРЭ, 2010. – 444 с.

2. Гриб О. Г. Проблемы обеспечения синхронизации измерений при определении оценки соответствия качества электрической энергии / О. Г. Гриб, Т. С. Иерусалимова, Д. А. Гапон, Р. В. Жданов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №6/8 (72). – С. 4–9.
3. Сиротин Ю. А. Сбалансированная и разбалансированная составляющая тока в трехфазной несимметричной системе / Ю. А. Сиротин // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2008. – Вип. 18, Ч. 2. – С. 81–87.
4. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
5. Сиротин Ю. А. Компенсация и учет реактивной мощности в электротехнических системах с несимметричными режимами / Ю. А. Сиротин. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – 336 с.
6. Sokol Y. I. Network-centric technologies for control of three-phase network operation modes / Y. I. Sokol, O. G. Gryb, S. V. Shvets, [et al.] // Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – №. 3. – p. 67–71.
7. Сокол Е. И. Качество электрической энергии. Том 2. Контроль качества электрической энергии / Е. И. Сокол, О. Г. Гриб, А. Ф. Жаркин. – Х.: ПП «Граф-Икс», 2014. – 244 с.
8. Sokol Y. I. The development of the theory of instantaneous power of three-phase network in terms of network centrism. / Y. I. Sokol, O. G. Gryb, S. V. Shvets, [et al.] // Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – №. 4 – p. 61–65.
9. Гриб О. Г. Синтез элементов энергосистемы по критерию надежности в условиях кибербезопасности / О. Г. Гриб, С. В. Швец, А. В. Бортников // Вісник НТУ «ХПИ». Сер.: Інформатика та моделювання. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – № 50(1271). – С. 97–110.

References (transliterated)

1. Grib, O. G., V. I. Vasil'chenko and V. I. Gromadskij *Kontrol' potreblenija jelektrojenergii s uchetom ee kachestva*. Kharkov: HNURJE Publ., 2010. Print.
2. Grib, O. G., et al. "Problemy obespechenija sinhronizacii izmerenij pri opredelenii ocenki sootvetstvija kachestva jelekticheskoj jenergii." *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij* 6.8 (2014): 4–9. Print.
3. Sirotin, Yu. A. "Sbalansirovannaja i razbalansirovannaja sostavljajushhaja toka v trehfaznoj nesimmetrichnoj sisteme." *Visnyk Pryazov'skogo derzhavnogo tehničnogo universytetu*. No. 18.2. 2008. 81–87. Print.
4. Zhelezko, Yu. S. *Poteri jelektrojenergii. Reaktivnaja moshhnost'. Kachestvo jelektrojenergii. Rukovodstvo dlja praktičeskikh raschetov*. Moscow: JeNAS, 2009. Print.
5. Sirotin, Yu. A. *Kompensacija i uchet reaktivnoj moshhnosti v jelektrotehničeskix sistemah s nesimmetrichnyx režhimami*. Kharkov: NTU "KhPI", 2014. Print.
6. Sokol, Y. I., et al. "Network-centric technologies for control of three-phase network operation modes." *Electrical engineering & electromechanics* 3 (2017): 67–71. Print.
7. Sokol, E. I., O. G. Grib, and A. F. Zharkin *Kachestvo jelekticheskoj jenergii. Tom 2. Kontrol' kachestva jelekticheskoj jenergii*. Kharkov: PP «Graf-Iks», 2014. Print.
8. Sokol, Y. I., et al. "The development of the theory of instantaneous power of three-phase network in terms of network centrism." *Electrical engineering & electromechanics* 4 (2017): 61–65. Print.
9. Grib, O. G., S. V. Shvec, and A. V. Bortnikov "Sintez jelementov jenergosistemy po kriteriju nadezhnosti v uslovijah kiberbezopasnosti." *Visnyk NTU "KhPI". Ser.: Informatyka ta modeljuvannja*. No 50(1271). Kharkov: NTU "KhPI", 2017. 97–110. Print.

Поступила (received) 20.04.2018

Определение экстремумов мощности и потерь в отдельной фазе электрической сети / О. Г. Гриб, Т. С. Донецкая, С. В. Швец, А. В. Бортников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 17 (1293). – С. 82–87. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online)

Определение экстремумов мощности и потерь в отдельной фазе электрической сети / О. Г. Гриб, Т. С. Донецкая, С. В. Швец, А. В. Бортников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х.: НТУ «ХПІ», 2018. – № 17 (1293). – С. 82–87. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online)

Determination of the extremes of power and losses in a separate phase of the electrical network / O. G. Gryb, T. S. Donetskaya, S. V. Shvets, A. V. Bortnikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hidrounits. – Kharkov: NTU "KhPI", 2018. – No. 17 (1293). – P. 82–87. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online)

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гриб Олег Герасимович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; тел.: (057) 707-65-51, (050) 139-24-39.

Гриб Олег Герасимович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой автоматизации и кибербезопасности энергосистем; тел.: (057) 707-65-51, (050) 139-24-39.

Gryb Oleg Gerasimovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University " Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department automation and cybersecurity of electric power systems; tel.: (057) 707-65-51, (050) 139-24-39.

Донецька Тетяна Сергіївна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; тел.: (057) 707-65-51; e-mail: iierusalimovat@gmail.com.

Донецкая Татьяна Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры автоматизации и кибербезопасности энергосистем; тел.: (057) 707-65-51; e-mail: iierusalimovat@gmail.com.

Donetskaya Tatyana Sergeevna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of Department of automation and cybersecurity of electric power systems; tel.: (057) 707-65-51; e-mail: iierusalimovat@gmail.com.

Швец Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; тел.: (067) 768-08-38; e-mail: se55sh32@gmail.com.

Швец Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры автоматизации и кибербезопасности энергосистем; тел.: (067) 768-08-38; e-mail: se55sh32@gmail.com.

Shvets Sergey Viktorovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of Department of automation and cybersecurity of electric power systems; tel.: (067) 768-08-38; e-mail: se55sh32@gmail.com.

Бортников Олександр Вікторович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; тел.: (067) 900-76-48; e-mail: a42km@ya.ru.

Бортников Александр Викторович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры автоматизации и кибербезопасности энергосистем; тел.: (067) 900-76-48; e-mail: a42km@ya.ru.

Bortnikov Alexander Viktorovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student at the Department of automation and cybersecurity of electric power systems; tel.: (067) 900-76-48; e-mail: a42km@ya.ru.