

УДК 621.311

*С. В. ШВЕЦ, О. Г. ГРИБ, Т. С. ДОНЕЦКАЯ, А. П. МАРИНЕНКО, И. Т. КАРПАЛЮК***РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ПОТЕРЬ В ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

В последние годы значительное внимание уделяется повышению эффективности генерации, передачи и потребления электрической энергии. Проблема влияния высших гармоник является одной из важных частей общей проблемы электромагнитной совместимости приемников электроэнергии с питающей электрической сетью. Актуальными остаются вопросы дальнейшего совершенствования существующих алгоритмов расчета и анализа потерь электрической энергии. Целью статьи является обоснование математического аппарата выделения энергетических составляющих полной мощности, которую можно передать потребителю при заданном характере напряжения и уровне потерь на активном сопротивлении проводов в линиях электропередач в трехфазной электрической сети, а также определение структуры и значений потерь при заданном характере напряжения и уровне потребляемой мощности с помощью коэффициента потерь. В основе решения указанной задачи лежит поиск экстремумов мгновенной и средней мощности, а также потерь на активном сопротивлении проводов линий электропередач в трехфазной электрической сети. Решение данной задачи формирует требования к идеальному потребителю в трехпроводной электрической сети независимо от симметрии и гармонического состава питающего напряжения. Сформулированы и решены задачи поиска экстремумов мощности в зависимости от характера тока при заданной форме напряжения и абсолютного экстремума функции мощности от соотношения гармонических составляющих. Получены соотношения для коэффициентов мощности и потерь на активном сопротивлении проводов в линиях электропередач в трехфазной электрической сети. Соотношения позволяют рассчитывать как мгновенные, так и интегральные оценки качества электропотребления, учитывающие такие свойства потребителя как симметрия, линейность, наличие реактивности. Решение данных задач позволяет сделать выводы о том, что идеальным потребителем в трехпроводной электрической сети независимо от симметрии и гармонического состава питающего напряжения является симметричный треугольник активных сопротивлений.

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

*С. В. ШВЕЦЬ, О. Г. ГРИБ, Т. С. ДОНЕЦЬКА, А. П. МАРИНЕНКО, І. Т. КАРПАЛЮК***РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ І ВТРАТ В ТРИФАЗНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ**

В останні роки значна увага приділяється підвищенню ефективності генерації, передачі і споживанню електричної енергії. Проблема впливу вищих гармонік є однією з важливих частин загальної проблеми електромагнітної сумісності приймачів електроенергії з живильною електричною мережею. Актуальними залишаються питання подальшого вдосконалення існуючих алгоритмів розрахунку і аналізу втрат електричної енергії. Метою статті є обґрунтування математичного апарату виділення енергетичних складових повної потужності, яку можна передати споживачеві при заданому характері напруги і рівні втрат на активному опорі проводів в лініях електропередач в трифазній електричній мережі, а також визначення структури і значень втрат при заданому характері напруги і рівні споживаної потужності за допомогою коефіцієнта втрат. В основі вирішення зазначеної задачі лежить пошук екстремумів миттєвої і середньої потужності, а також втрат на активному опорі проводів ліній електропередач в трифазній електричній мережі. Рішення даної задачі формує вимоги до ідеального споживача у трьохпроводній електричній мережі незалежно від симетрії і гармонійного складу напруги живлення. 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. Отримано співвідношення для коефіцієнтів потужності і втрат на активному опорі проводів в лініях електропередач в трифазній електричній мережі. Співвідношення дозволяють розраховувати як миттєві, так і інтегральні оцінки якості електроспоживання, враховують такі властивості споживача як симетрія, лінійність, наявність реактивності. Рішення даних задач дозволяє зробити висновки про те, що ідеальним споживачем у трьохпроводній електричній мережі незалежно від симетрії і гармонійного складу напруги живлення є симетричний трикутник активних опорів.

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

*S. V. SHVETS, O. G. GRYB, T. S. DONETSKAYA, A. P. MARINENKO, I. T. KARPALYUK***CALCULATION OF POWER AND LOSSES IN A THREE-PHASE ELECTRIC NETWORK**

In recent years, considerable attention has been paid to improving the efficiency of generation, transmission and consumption of electric energy. The problem of the influence of higher harmonics is one of the important parts of the general problem of electromagnetic compatibility of electricity receivers with the power supply network. The issues of further improvement of the existing algorithms for calculating and analyzing electric energy losses remain relevant. The purpose of the article is to substantiate the mathematical apparatus for extracting the energy components of total power, which can be transferred to the consumer for a given voltage pattern and loss level on the active resistance of wires in power lines in a three-phase electrical network, as well as determining the structure and loss values for a given voltage pattern and power consumption using loss factor. The solution to this problem is based on the search for extremums of instantaneous and average power, as well as losses on the active resistance of wires of power lines in a three-phase electric network. The solution of this problem forms the requirements for the ideal consumer in a three-wire electrical network, regardless of the symmetry and harmonic composition of the supply voltage. The problems of search for power extremes are formulated and solved depending on the nature of the current for a given voltage form and the absolute extremum of the power function depending on the ratio of the harmonic components. Ratios for power factors and losses on active resistance of wires in power lines in a three-phase electric network are obtained. The ratios make it possible to calculate both instantaneous and integral assessments of the quality of power consumption, taking into account consumer properties such as symmetry, linearity, and the presence of reactivity. Solving these problems allows us to draw conclusions that the ideal consumer in a three-wire electrical network, regardless of the symmetry and harmonic composition of the supply voltage, is a symmetrical triangle of active resistances.

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

© С. В. Швец, О. Г. Гриб, Т. С. Донецкая, А. П. Мариненко, И. Т. Карпалюк, 2018

Введение. Последние годы значительное внимание уделяется повышению эффективности генерации, передачи и потребления электрической энергии. На эффективность использования

электрической энергии влияет большое количество факторов конструктивного, технологического и эксплуатационного характера. Одной из важнейших составляющих комплекса энергосберегающих мероприятий является снижение потерь электрической энергии в электрических сетях [1, 2].

В круг вопросов этой комплексной проблемы входят такие составляющие, как снижение технологических потерь электроэнергии, повышение качества и надежности функционирования электрических сетей и систем, анализ и коррекция действующих в настоящее время нормативов [3].

Процесс передачи и распределения электроэнергии эффективен, если выполняется не только минимум относительных потерь, но и обеспечиваются нормальные (договорные) требования по пропускной способности, качеству и надежности электроснабжения.

В настоящее время более 70 % электроэнергии поступает в сеть в преобразованном виде (в металлургии – более 90 %), поэтому наблюдаются возрастание уровней электромагнитных потерь, их отрицательное влияние на системы управления, контроля и сигнализации и ухудшение электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики [4]. Для нормализации качества электроэнергии также необходима минимизация кондуктивных помех, в первую очередь высших гармоник, несимметрии и колебаний напряжения.

Низкий уровень качества электрической энергии приводит к значительному снижению энергетической эффективности электрических сетей за счет увеличения потерь активной и реактивной мощностей, технологического расхода электроэнергии на ее транспорт, к снижению срока службы электрооборудования, увеличению капитальных вложений в электрические сети, нарушению условий нормального функционирования энергетической системы [4 – 6].

Анализ последних исследований и литературы. В настоящее время из всех показателей качества электроэнергии существенное влияние на систему учета электропотребления оказывают высшие гармоники, которые создают дополнительные погрешности в каждой точке учета электропотребления в электрических сетях [7, 8].

Высокий уровень потерь в электрических сетях связан с низким уровнем компенсации реактивной мощности, физическим и моральным износом сети, недостаточным использованием средств оптимизации режимов работы и регулирования напряжения и нерешенности проблем качества электрической энергии [9].

Несинусоидальный ток создает несинусоидальные падения напряжения в сопротивлениях питающей сети. Падения напряжения, обусловленные этими

токами, вызывают искажение кривой напряжения питания, что может повлечь за собой нарушения работы других приемников, создавая опасность возникновения перегрузки цепей и резонанса в цепях, содержащих емкости.

Проблема влияния высших гармоник является одной из важных частей общей проблемы электромагнитной совместимости приемников электроэнергии с питающей электрической сетью [10].

Также актуальными остаются вопросы дальнейшего совершенствования существующих алгоритмов расчета и анализа потерь электрической энергии, разработки многокритериальных подходов к оптимизации систем передачи и распределения электроэнергии с целью повышения надежности и эффективности их функционирования [11, 12].

Существующий математический аппарат не позволяет корректно оценивать весь спектр возможных искажений и их комбинаций [5, 6, 9].

Таким образом, целесообразна разработка математического аппарата выделения энергетических составляющих полной мощности, позволяющего получить оценку влияния того или иного потребителя на качество электрической энергии независимо от режима работы электрической сети.

Цель статьи. Обоснование математического аппарата выделения энергетических составляющих полной мощности, которую можно передать потребителю при заданном характере напряжения и уровне потерь на активном сопротивлении проводов в линиях электропередач в трехфазной электрической сети, а также определение структуры и значений потерь при заданном характере напряжения и уровне потребляемой мощности с помощью коэффициента потерь.

Постановка проблемы. В сложившихся условиях эксплуатации электрических сетей возникает необходимость в создании математического аппарата выделения энергетических составляющих полной мощности для учета таких свойств потребителя как симметрия, линейность, наличие реактивности. Данные выражения 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 формирует требования к идеальному потребителю в трехпроводной электрической сети независимо от симметрии и гармонического состава питающего напряжения.

Материалы исследований. Рассмотрим трехфазную сеть. На величину потерь влияет не только форма тока, но и распределение токов по фазам. Определим, какую же максимальную мгновенную мощность можно передать при том же

уровне мгновенных потерь. Мгновенная мощность потерь может быть описана как:

$$p_{L3} = p_{LA} + p_{LB} + p_{LC} = r_A i_A^2 + r_B i_B^2 + r_C i_C^2. \quad (1)$$

Для упрощения примем, что:

$$r_A = r_B = r_C = r, \quad (2)$$

а также потребуем, чтобы

$$i_A + i_B + i_C = 0. \quad (3)$$

Обозначим сумму квадратов токов:

$$p_{L3} = r(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2) = r I_{S3}, \quad (4)$$

$$I_{S3} = i_A^2 + i_B^2 + i_C^2 = 3i_{RMS3}^2, \quad (5)$$

где $i_{RMS3} = \sqrt{\frac{I_{S3}}{3}}$ – мгновенное среднеквадратическое значение трехфазного тока.

Мгновенная мощность, передаваемая в нагрузку равна:

$$p_3 = p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C. \quad (6)$$

Из (3) получим:

$$i_A = -i_B - i_C, \quad (7)$$

подставив в (5) получим:

$$(-i_B - i_C)^2 + i_B^2 + i_C^2 = I_{S3}, \quad (8)$$

откуда:

$$i_B = -\frac{i_C}{2} \pm \frac{\sqrt{-3i_C^2 + 2I_{S3}}}{2}, \quad (9)$$

подставив в (7), получим:

$$i_A = -\frac{i_C}{2} \mp \frac{\sqrt{-3i_C^2 + 2I_{S3}}}{2}, \quad (10)$$

подставив в выражение (6), имеем:

$$p_3 = u_A \left(-\frac{i_C}{2} \mp \frac{\sqrt{-3i_C^2 + 2I_{S3}}}{2} \right) + u_B \left(-\frac{i_C}{2} \pm \frac{\sqrt{-3i_C^2 + 2I_{S3}}}{2} \right) + u_C i_C. \quad (11)$$

Для нахождения точки экстремума следует решить уравнение, продифференцировав и приравняв производную к нулю:

$$\frac{\partial p_3}{\partial i_C} = u_A \left(-\frac{1}{2} \pm \frac{3}{2\sqrt{-3i_C^2 + 2I_{S3}}} i_C \right) + u_B \left(-\frac{1}{2} \mp \frac{3}{2\sqrt{-3i_C^2 + 2I_{S3}}} i_C \right) + u_C = 0. \quad (12)$$

Решение уравнения имеет вид:

$$i_C = \mp \sqrt{\frac{I_{S3}}{3U_{S3L}}} (u_A + u_B - 2u_C). \quad (13)$$

Тогда

$$U_{S3L} = 2(u_A^2 + u_B^2 + u_C^2 - u_A u_B - u_A u_C - u_B u_C). \quad (14)$$

Выражение (14) перепишем в виде:

$$\begin{aligned} U_{S3L} &= 2(u_A^2 + u_B^2 + u_C^2 - u_A u_B - u_A u_C - u_B u_C) = \\ &= (u_A^2 - 2u_A u_B + u_B^2) + (u_B^2 - 2u_B u_C + u_C^2) + \\ &\quad + (u_C^2 - 2u_C u_A + u_A^2) = \\ &= (u_A - u_B)^2 + (u_B - u_C)^2 + (u_C - u_A)^2 = \\ &= u_{AB}^2 + u_{BC}^2 + u_{CA}^2 = 3u_{RMS3L}^2, \end{aligned} \quad (15)$$

где $u_{RMS3L} = \sqrt{\frac{U_{S3L}}{3}}$ – мгновенное среднеквадратическое значение линейного напряжения трехфазной сети.

Подставив (15) в (9) и (10) получим:

$$i_B = \mp \sqrt{\frac{I_{S3}}{3U_{S3L}}} (u_A + u_C - 2u_B). \quad (16)$$

Соотношение (16) представим в виде:

$$i_A = \mp \sqrt{\frac{I_{S3}}{3U_{S3L}}} (u_B + u_C - 2u_A). \quad (17)$$

Далее, подставив (13) в (11) получим итоговое выражение для экстремумов мощности:

$$p_{3(1,2)} = \pm \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{I_{S3} U_{S3L}} = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} i_{RMS3} u_{RMS3L}. \quad (18)$$

где решение 1 соответствует максимуму, а решение 2 – минимуму мощности.

Тогда:

$$p_{3MAX} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{I_{S3} U_{S3L}} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_{RMS3} u_{RMS3L} \quad (19)$$

Перепишем (13) в виде:

$$\begin{aligned}
 i_C &= -\sqrt{\frac{I_{S3}}{3U_{S3L}}}(u_A + u_B - 2u_C) = \\
 &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{i_{RMS3}}{u_{RMS3L}} [(u_B - u_C) - (u_C - u_A)] = \\
 &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{i_{RMS3}}{u_{RMS3L}} (u_{BC} - u_{CA}) = \\
 &= -\left(\frac{i_{RMS3}}{\sqrt{3}u_{RMS3L}} u_{BC} - \frac{i_{RMS3}}{\sqrt{3}u_{RMS3L}} u_{CA} \right) = \\
 &= -(i_{BC} - i_{CA}).
 \end{aligned} \tag{20}$$

Обозначив

$$R_{LMAXP} = \sqrt{3} \frac{u_{RMS3L}}{i_{RMS3}}, \tag{21}$$

получим:

$$i_{BC} = \frac{i_{RMS3}}{u_{RMS3L}} u_{BC} = \frac{u_{BC}}{R_{LMAXP}}; \tag{22}$$

$$i_{CA} = \frac{i_{RMS3}}{u_{RMS3L}} u_{CA} = \frac{u_{CA}}{R_{LMAXP}}; \tag{23}$$

$$i_B = (i_{BC} - i_{AB}), \tag{24}$$

$$i_{AB} = \frac{i_{RMS3}}{u_{RMS3L}} u_{AB} = \frac{u_{AB}}{R_{LMAXP}}; \tag{25}$$

$$i_A = (i_{AB} - i_{CA}). \tag{26}$$

Таким образом, мгновенный коэффициент мощности трехфазной сети при условии отсутствия тока нулевой последовательности:

$$PF_i = \frac{p_3}{P_{3MAX}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{p_3}{i_{RMS3} u_{RMS3L}} \leq 1. \tag{27}$$

Далее определим минимум мгновенных потерь активной мощности в трехпроводной электрической сети. Для этого необходимо решить обратную задачу – нахождение минимальных потерь, при том же значении мгновенной мощности.

Подставив (7) в (6) получим:

$$\begin{aligned}
 p_3 &= p_A + p_B + p_C = \\
 &= u_A(-i_B - i_C) + u_B i_B + u_C i_C,
 \end{aligned} \tag{28}$$

откуда

$$i_B = -\frac{u_A i_C - u_C i_C + p_3}{u_A - u_B}. \tag{29}$$

Подставив выражение (29) в (7) получим:

$$i_A = \frac{u_A i_C - u_C i_C + p_3}{u_A - u_B} - i_C. \tag{30}$$

Произведя подстановку (30) в выражение (5) получим:

$$\begin{aligned}
 I_{S3} &= \left(\frac{u_A i_C - u_C i_C + p_3}{u_A - u_B} - i_C \right)^2 + \\
 &+ \left(-\frac{u_A i_C - u_C i_C + p_3}{u_A - u_B} \right)^2 + i_C^2.
 \end{aligned} \tag{31}$$

Продифференцируем выражение (31) и приравняем производную к нулю. Получим:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial I_{S3}}{\partial i_C} &= 2 \left(\frac{u_A i_C - u_C i_C + p_3}{u_A - u_B} - i_C \right) \left(\frac{u_A - u_C}{u_A - u_B} - 1 \right) + \\
 &+ 2 \left(-\frac{u_A i_C - u_C i_C + p_3}{u_A - u_B} \right)^2 (u_A - u_C) + 2i_C = 0.
 \end{aligned} \tag{32}$$

Решение уравнения (32) состоит в следующем:

$$i_C = \frac{2u_C - u_A - u_B}{U_{S3L}} p_3, \tag{33}$$

подставив его в (29) получим:

$$i_B = \frac{2u_B - u_A - u_C}{U_{S3L}} p_3, \tag{34}$$

и, соответственно, из формулы (30) имеем:

$$i_A = \frac{2u_A - u_B - u_C}{U_{S3L}} p_3. \tag{35}$$

Таким образом, минимальный уровень потерь возникает при:

$$\begin{aligned}
 I_{S3MIN} &= \frac{p_3^2}{U_{S3L}^2} \times \\
 &\times \left((2u_A - u_B - u_C)^2 + (2u_B - u_A - u_C)^2 + \right. \\
 &\left. + (2u_C - u_A - u_B)^2 \right) = \\
 &= \frac{p_3^2}{U_{S3L}^2} (3U_{S3L}) = 3 \frac{p_3^2}{U_{S3L}} = \frac{p_3^2}{u_{RMS3L}^2},
 \end{aligned} \tag{36}$$

и равен:

$$P_{L3MIN} = r I_{S3MIN} = r \frac{p_3^2}{u_{RMS3L}^2}. \tag{37}$$

Перепишем выражение для фазного тока в виде:

$$i_C = \frac{2u_C - u_A - u_B}{U_{S3L}} P_3 = \frac{P_3}{3u_{RMS3L}^2} \times ((u_C - u_A) - (u_B - u_C)) = \frac{P_3}{3u_{RMS3L}^2} (u_{CA} - u_{BC}) = i_{CA} - i_{BC}. \quad (38)$$

Данное выражение показывает, что идеальный потребитель представляет собой симметричный треугольник, сопротивление плеч которого равно:

$$R_{L\text{MIN}} = 3 \frac{u_{RMS3L}^2}{P_3}. \quad (39)$$

Коэффициент потерь равен:

$$LF_i = \frac{P_{L3}}{P_{L3\text{MIN}}} = \frac{rI_{S3}}{rI_{S3\text{MIN}}} = \frac{3u_{RMS3L}^2 i_{RMS3}^2}{P_3^2} \geq 1. \quad (40)$$

Аналогично рассмотренному выше однофазному случаю [13], можно записать выражения для мощности, передаваемой по трехфазной цепи представив напряжения и токи в виде суммы гармоник. Очевидно, что выражения будут в целом повторять полученные и результат будет сходным. Таким образом, интегральные оценки качества потребления могут быть получены исходя из характера “идеального” потребителя. Для трехфазной трехпроводной цепи таким потребителем является симметричный треугольник из постоянных активных сопротивлений.

Тогда интегральный коэффициент мощности для трехфазной сети:

$$PF_3 = \frac{P_3}{P_{3\text{MAX}}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{P_3}{I_{RMS3} U_{RMS3L}}, \quad (41)$$

где

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_3(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t)); \quad (42)$$

$$I_{RMS3} = \sqrt{\frac{1}{3T} \int_0^T (i_A^2(t) + i_B^2(t) + i_C^2(t)) dt}; \quad (43)$$

$$U_{RMS3L} = \sqrt{\frac{1}{3T} \int_0^T (u_{AB}^2(t) + u_{BC}^2(t) + u_{CA}^2(t)) dt}. \quad (44)$$

А коэффициент потерь представляет собой выражение (45):

$$LF_3 = \frac{1}{PF_3^2} = \frac{3I_{RMS3}^2 U_{RMS3L}^2}{P_3^2}. \quad (45)$$

Такие коэффициенты учитывают все возможные факторы “неидеальности” потребителя, включающие несимметрию, реактивность, нелинейность и нестационарность.

Результаты исследований. Далее были проведены исследования процессов энергопотребления в трехфазных сетях при различных характерах питающего напряжения и нагрузки. Для проверки корректности работы модели первым был рассмотрен идеальный случай, когда напряжение и нагрузка симметричны, напряжения синусоидальны, а нагрузка представляет собой симметричный треугольник активных сопротивлений. На рис. 1 и 2 показаны кривые исходных фазных напряжений и токов.

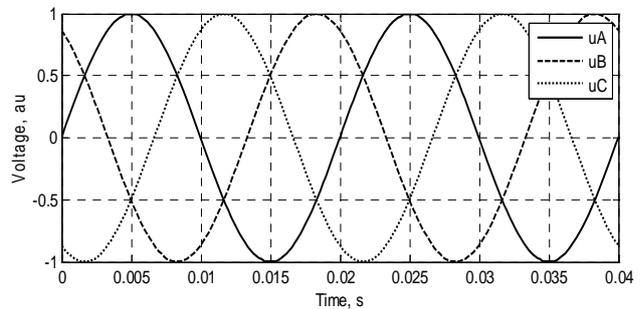


Рис. 1. Кривые фазных напряжений

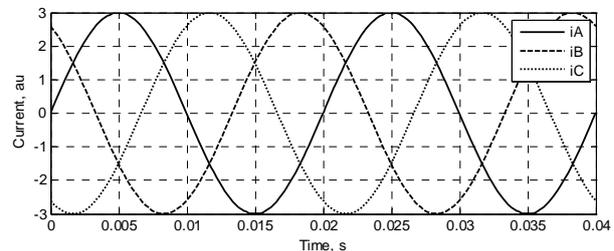


Рис. 2. Кривые фазных токов

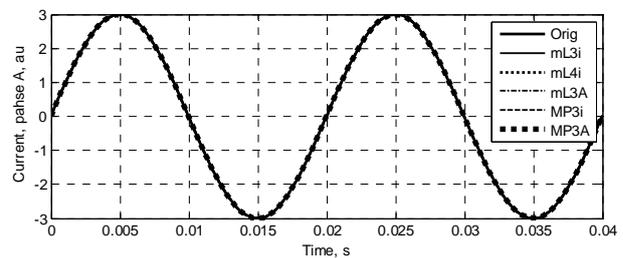


Рис. 3. Кривые тока фазы А согласно рассмотренным критериям

На рис. 3–5 показаны кривые тока фазы А, мощности и потерь, полученных согласно рассмотренных критериев. Как видно из рисунков, в данном случае все кривые совпадают, а все полученные значения коэффициентов мощности и потерь равны 1. Это подтверждает правильность и реализуемость моделей и сделанные ранее выводы о

том, что экстремумы функций мощности и потерь имеют место в случае, когда нагрузка представляет собой симметричный треугольник активных сопротивлений.

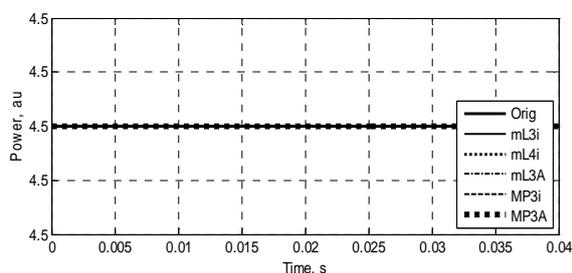


Рис. 4. Кривые мгновенной мощности

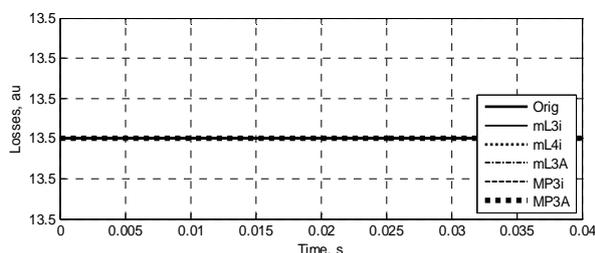


Рис. 5. Кривые мгновенных потерь

Выводы. Получены соотношения для выполнения оценки качества электропотребления в трехфазной трехпроводной и четырехпроводной сетях. Для этого были решены задачи поиска экстремумов мгновенной и средней мощности, а также потерь на активном сопротивлении проводов линий электропередач. Решение данных задач позволяет сделать выводы о том, что идеальным потребителем в трехпроводной электрической сети независимо от симметрии и гармонического состава питающего напряжения является симметричный треугольник активных сопротивлений. Соотношения позволяют рассчитывать как мгновенные, так и интегральные оценки качества электропотребления, учитывающие такие свойства потребителя как симметрия, линейность, наличие реактивности.

Список литературы

1. Горелов С. В., Хомутов С. О., Поляков И. А., Денчик Ю. М. Автоматизация расчётов режимов потоков активной мощности в электроэнергетических системах / ред. Горелова В. П., Сальникова В. Г. Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. ун-та водн. трансп., 2016. 120 с.
2. Сокол Е. И., Гриб О. Г., Жаркин А. Ф. Качество электрической энергии. Т. 2. Контроль качества электрической энергии. Харьков: ПП «Граф-Икс», 2014. 244 с.
3. Пантелеев В. И., Поддубных Л. Ф. Многоцелевая оптимизация и автоматизированное проектирование управления качеством электроснабжения в электроэнергетических системах: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2009. 194 с.
4. Жежеленко И. В. Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения

электрической энергии. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Сер.: Энергетика. 2018. Т. 61, № 1. С. 28–35.

5. Сиротин Ю. А. Компенсация и учет реактивной мощности в электротехнических системах с несимметричными режимами. Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. 336 с.
6. Shvets S. V., Sokol Y. I., Gryb O. G., [et al.] Network-centric technologies for control of three-phase network operation modes *Electrical engineering & electromechanics*. 2017. no. 3. pp. 67–71.
7. Степанов В. М., Базыль И. М. Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии. Изв. ТулГУ. Сер.: Технические науки. 2013. вып. 12, Ч. 2. С. 27–31.
8. Куско А., Томпсон М. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии. Москва: Додэка-XXI. 2010. 336 с.
9. Shvets S. V., Sokol Y. I., Gryb O. G., [et al.] The development of the theory of instantaneous power of three-phase network in terms of network centrism. *Electrical engineering & electromechanics*. 2017. no. 4. pp. 61–65.
10. Сиротин Ю. А. Сбалансированная и разбалансированная составляющая тока в трехфазной несимметричной системе. *Вісник Приазовського державного ТУ: сб. науч. тр. Сер.: Технические науки*. 2008. вип. 18, Ч. 2. С. 81–87.
11. Бартоломей П. И., Тащилин В. А. Информационное обеспечение задач электроэнергетики: учеб. пособие. 2-е изд. Москва: ФЛИНТА, 2017. 108 с.
12. Бунтеев Ю. Е., Кузнецов В. А., Радковский А. К. Измерение реактивной энергии в электрических сетях при наличии высших гармоник. *Записки Горного института*. 2012. Т. 196. С. 231–235.
13. Гриб О. Г., Швеи С. В., Донецкая Т. С., Бортников А. В. Определение экстремумов мощности и потерь в отдельной фазе электрической сети. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Серия: Гідравлічні машини та гідроагрегати. Харків: НТУ «ХПИ»*. 2018. № 17(1293). С. 82–87.

References (transliterated)

1. Gorelov S. V., Homutov S. O., Poljakov I. A., Denchik Ju. M. *Avtomatizacija raschjotov rezhimov peretokov aktivnoj moshhnosti v jelektrojenergeticheskix sistemah* [Automation of calculations of active power flow modes in electric power systems]. Novosibirsk, Izd-vo Sib. gos. un-ta vodn. transp. Publ., 2016. 120 p.
2. Sokol E. I., Grib O. G., Zharkin A. F. *Kachestvo jelektricheskoy jenerгии. T. 2. Kontrol' kachestva jelektricheskoy jenerгии* [The quality of electrical energy. Vol. 2. Quality control of electrical energy]. Kharkov, PP «Graf-Iks» Publ., 2014. 244 p.
3. Panteleev V. I., Poddubnyh L. F. *Mnogocелевая optimizacija i avtomatizirovanoe proektirovanie upravlenija kachestvom jelektrosnabzhenija v jelektrojenergeticheskix sistemah: monografija* [Multi-purpose optimization and computer-aided design of power quality management in electric power systems: monograph]. Krasnojarsk, Sibirskij federal'nyj universitet Publ., 2009. 194 p.
4. Zhezhelenko I. V. Osnovnye napravlenija povyszenija jeffektivnosti proizvodstva, peredachi i raspredelenija jelektricheskoy jenerгии [The main directions of increasing the efficiency of production, transmission and distribution of electric energy]. *Izvestiya vyssh. ucheb. zavedenij i jenerг. obedinenij SNG. Seriya: Jenerгетика*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 28–35.
5. Sirotn Ju. A. *Kompensacija i uchet reaktivnoj moshhnosti v jelektrotehnicheskix sistemah s nesimmetrichnymi rezhimami* [Compensation and accounting of reactive power in electrical systems with asymmetric modes]. Kharkov, NTU"KhPI" Publ., 2014. 336 p.
6. Shvets S. V., Sokol Y. I., Gryb O. G., [et al.] Network-centric technologies for control of three-phase network operation modes *Electrical engineering & electromechanics*. 2017, no. 3, pp. 67–71.
7. Stepanov V. M., Bazyl' I. M. Vlijanie vysshix garmonik v sistemah jelektrosnabzhenija predprijatija na poteri jelektricheskoy jenerгии. [Influence of higher harmonics in the enterprise's power supply systems on electric power losses]. *Izvestija TulGU. Seriya: Tehnicheskie nauki*. 2013, vol. 12, no. 2, pp. 27–31.
8. Kusko A., Tompson M. *Seti jelektrosnabzhenija. Metody i sredstva obespechenija kachestva jenerгии* [Power supply networks. Methods

- and means of ensuring the quality of energy]. Moscow, Dodjeka-XXI Publ., 2010. 336 p.
9. Shvets S. V., Sokol Y. I., Gryb O. G., [et al.] The development of the theory of instantaneous power of three-phase network in terms of network centrism. *Electrical engineering & electromechanics*. 2017, no. 4, pp. 61–65.
 10. Sirotin Ju. A. Sbalansirovannaja i razbalansirovannaja sostavljajushhaja toka v trehfaznoj nesimmetrichnoj sisteme [Balanced and unbalanced current component in three-phase asymmetric system]. *Visnyk Pryazov'skogo derzhavnogo tehničnogo universytetu. sb. nauch. tr. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*. [Bulletin of the Priazov State Technical University]. Publ., 2008, no. 18, part 2, pp. 81–87.
 11. Bartolomej P. I., Tashhilin V. A. *Informacionnoe obespechenie zadach jelektroenergetiki: ucheb. posobie* [Information support of tasks of electric power industry: studies allowance] Moscow, FLINTA Publ., 2017. 108 p.
 12. Bunteev Ju. E., Kuznecov V. A., Radkovskij A. K. Izmerenie reaktivnoj jenerгии v jelektricheskijh setjah pri nalichii vysshih garmonik [Measurement of reactive energy in electrical networks in the presence of higher harmonics] *Zapiski Gornogo instituta*. 2012, vol. 196, pp. 231–235.
 13. Grib O. G., Shvec S. V., Doneckaja T. S., Bortnikov A. V. Opredelenie jekstremumov moshhnosti i poter' v otdel'noj faze jelektricheskijh seti [Determination of power extremes and losses in a separate phase of the electrical network]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Seriya: Gidravlichni mashini ta gidroagregati*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Series: Hydraulic machines and hydraulic units] Kharkov, NTU"KhPI" Publ., 2018, no. 17(1293), pp. 82–87.

Поступила (received) 29.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

Донецька Тетяна Сергіївна (Донецкая Татьяна Сергеевна, Donetskaya Tatyana Sergeevna) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0925-1001>; e-mail: iierusalimovat@gmail.com

Мариненко Анатолій Петрович (Мариненко Анатолий Петрович, Marinenko Anatoly Petrovich) – голова правління громадської організації «Ентузіаст»; м. Енергодар, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0739-1676>; e-mail: anatolijmarinenko110@gmail.com

Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Игорь Тимофеевич, Karpalyuk Igor Timofeevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5634-6807>; e-mail: humpway@gmail.com