

## Анализ энергетических процессов при периодических режимах работы электрических цепей

ЧЕРЕДНИЧЕНКО Л.А.

*Проведен анализ энергетических процессов в системе «первичный источник энергии, генератор, электрическая цепь» при полигармоническом режиме работы. Анализ позволил с помощью мгновенной мощности определить интегральные характеристики мощности генератора и цепи. Введением дополнительных реактивных мощностей цепи и реактивных мощностей генератора внесена ясность в представления о физическом процессе в рассматриваемой системе. Полученные соотношения могут быть полезны при исследовании энергетических процессов в силовых цепях, в частности, в случае проектирования систем ограниченной мощности, а также при анализе искажений сигналов в информационных цепях с помощью энергетических оценок.*

**Ключевые слова:** *первичный источник энергии – генератор – нагрузка, периодические режимы, мощность цепи, интегральная характеристика, физические процессы*

Физические представления об энергетических процессах при периодических режимах работы электрических цепей развиваются в статье с помощью спектрального анализа мгновенной мощности. Рассматриваются ортогональные составляющие процесса во временной и частотной (векторной) областях при взаимно однозначном соответствии временных функций и их интегральных характеристик [1–3]. При этом используются энергетические представления, принятые в теории цепей, и вводятся новые.

Известный теоретический подход при анализе полигармонических процессов, рассмотренный, например, в [2], приводит к разложению полной мощности  $S$ , т.е. максимально возможной активной мощности, на три составляющие:  $P$  – активную,  $Q$  – реактивную и мощность искажения  $D$ , физическое толкование которой отсутствует:

$$S = UI = (P^2 + Q^2 + D^2)^{0,5}, \quad (1)$$

где  $U$ ,  $I$  – действующие значения напряжения и тока.

Причина возникшей неопределенности, по мнению автора, состоит в отсутствии осмысления энергетических процессов в системе «первичный источник энергии, генератор (преобразователь), нагрузка (цепь)», в частности, процессов между первичным источником энергии и генератором.

Рассмотрим три звена простейшей энергосистемы: первичный источник энергии  $I$  конечной мощности (электрической или неэлектрической природы); генератор  $G$  – преобразователь энергии без потерь (учет потерь лишь усложнит электрическую схему замещения системы) и электрическая цепь  $C$ , состоящая из идеализированных элементов  $r, L, C$  в соответствии со схемами замещения реальных устройств (рис. 1).

Генератор переменного тока изменяет интенсивность потребления энергии цепью, что вызывает соответствующий процесс между первичным источником и преобразователем. Энергетический процесс в целом описывается мгновенной мощностью, определяемой с помощью мгновенных значений тока и напряжения.

При периодическом режиме мгновенная мощность, получаемая перемножением рядов Фурье тока и напряжения, может быть представлена тригонометрическим рядом, частоты гармоник которого кратны частотам гармоник сомножителей. Слагаемые этого ряда образуют базисную систему ортогональных функций и однозначно сопоставляются с векторами в частотной области, причем длина каждого вектора равна амплитуде соответствующей гармоники в функциональном пространстве.

Квадрат нормы рассматриваемых тригонометрических функций мгновенной мощности равен квадрату длины суммарного вектора, т.е. квадрату интегрального значения полной мощности генератора. Часть нормы, связанная с активной и реактивной мощностями нагрузки, составляет полную мощность цепи. Указанные величины находятся композицией составляющих периодического процесса.

**Исследование процессов на первой гармонике.** Пусть линейный двухполюсник питается от генератора синусоидального напряжения  $u = U_m \sin(\omega t + j)$  при токе  $i = I_m \sin \omega t$ . Мгновенная мощность равна

$$p = ui = P(1 - \cos 2\omega t) + Q \sin 2\omega t = P - p_r + q_x, \quad (2)$$

где  $P = UI \cos j = rI^2$ ;  $Q = UI \sin j = xI^2$  – интегральные характеристики активной и реактивной мощ-

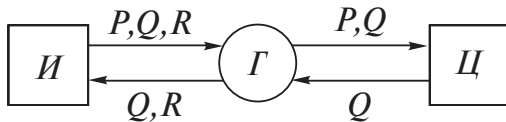


Рис. 1

ностей цепи;  $r, x$  – активное и реактивное сопротивления двухполюсника;  $p_r, q_x$  – мгновенные реактивные мощности, причем  $q_x = Q \sin 2\omega t$  – реактивная мощность двухполюсника;  $p_r = R \cos 2\omega t$  – реактивная мощность, связанная с изменяющейся интенсивностью потребления энергии цепью при синусоидальном режиме. Она проявляется во взаимодействии первичного источника и генератора; амплитуда  $R$ , равная  $P$ , определяет первичную составляющую реактивной мощности преобразователя.

В силу ортогональности полученных функций интегральной характеристикой мгновенной мощности цепи является полная мощность

$$S = (P^2 + Q^2)^{0,5}, \tag{3}$$

а генератора

$$S_{\Gamma} = (P^2 + Q^2 + R^2)^{0,5}. \tag{4}$$

Заметим, что в трехфазной симметричной цепи взаимная компенсация обменных процессов генератора с первичным источником приводит к постоянной интенсивности потребления энергии цепью, т.е. к неизменной мгновенной мощности, что улучшает характеристики энергосистемы.

Итак, в системе «первичный источник энергии, генератор, нагрузка» предлагается рассматривать две составляющие реактивной мощности  $Q$  и  $R$ . Между источниками, одновременно питающими цепь, возникает взаимное влияние, которое лишь частично учитывается в энергетическом балансе цепи.

Рассмотрим энергетические процессы в системе с двумя генераторами одинаковой частоты, включенными последовательно, и линейным двухполюсником. Анализ выполним комплексным методом при напряжениях генераторов  $\underline{U}_1 = U_1$ ,  $\underline{U}_2 = U_2 e^{j\gamma}$  и комплексном сопротивлении цепи  $\underline{Z} = z e^{j\beta} = r + jx$ . Входной ток двухполюсника представим суммой токов от действия каждого источника отдельно  $\underline{I}_1 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2$ . Комплексы полных мощностей генераторов:

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= \underline{U}_1 (\underline{I}_1 + \underline{I}_2) = z I_1^2 e^{j\beta} + z I_1 I_2 e^{-j(\gamma - \beta)} = \\ &= \underline{S}_{11} + \underline{S}_{12}; \\ \underline{S}_2 &= \underline{U}_2 (\underline{I}_1 + \underline{I}_2) = z I_2^2 e^{j\beta} + z I_1 I_2 e^{-j(\gamma + \beta)} = \end{aligned}$$

$$= \underline{S}_{22} + \underline{S}_{21},$$

где  $\underline{S}_{11} = P_1 + jQ_1$ ,  $\underline{S}_{22} = P_2 + jQ_2$  – комплексы полных мощностей генераторов, действующих отдельно;  $\underline{S}_{12} = P_{12} - jQ_{12}$ ,  $\underline{S}_{21} = P_{21} + jQ_{21}$  – комплексы дополнительных полных мощностей, обусловленных взаимодействием генераторов (в [4] они названы квазимощностями);  $\underline{I}_1, \underline{I}_2$  – сопряженные комплексы токов.

Дополнительные полные мощности определяются по формулам:

$$\underline{S}_{12} = P_a + jQ_a, \quad \underline{S}_{21} = P_a + jQ_a - P_{\Pi} + jQ_{\Pi},$$

где  $P_a = r I_1 I_2 \cos \gamma$ ;  $Q_a = x I_1 I_2 \cos \gamma$ ;  $P_{\Pi} = x I_1 I_2 \sin \gamma$ ;  $Q_{\Pi} = r I_1 I_2 \sin \gamma$ .

Комплекс полной мощности цепи

$$\underline{S} = \underline{S}_1(1) + \underline{S}_1(2) = \underline{S}_1(1) + \underline{S}_1(2) + 2(P_a + jQ_a),$$

т.е. не содержит составляющих  $P_{\Pi}, Q_{\Pi}$ .

Мощности  $P_a, Q_a$  связаны с увеличением или уменьшением активной и реактивной составляющих мощности цепи. Назовем их, соответственно, дополнительной активной и дополнительной реактивной мощностями цепи. Мощности  $P_{\Pi}, Q_{\Pi}$  характеризуют особенности работы двух взаимодействующих источников энергии и являются дополнительными активной и реактивной мощностями генераторов.

Установленные связи иллюстрируются диаграммой на рис. 2 [5], на которой выделены резистивная и реактивная нагрузки с соответствующими составляющими мощности. Однонаправленные стрелки подчеркивают активный характер составляющих мощности, а стрелки разного направления – реактивный характер. Связь дополнительных мощностей  $P_{\Pi}, Q_{\Pi}$  с параметрами цепи отмечена штриховыми линиями.

**Исследование процессов при действии двух гармоник напряжения.** Рассмотрим энергетические процессы в варианте двух источников напряжения разной частоты. Соответствующие гармоники могут создаваться одним первичным источником с нелинейным преобразователем (генератором) или разными источниками электрической энергии. В обоих случаях возникает лишь реактивная связь между источниками воздействия, ибо составляющие мгновенных дополнительных мощностей не имеют среднего значения.

Пусть источник ЭДС, питающий линейный двухполюсник, генерирует две гармоники напряжения:

$$u_{kq} = u_k + u_q = U_{mk} \sin(\omega_k t + \gamma_k + j_k) +$$

$$+ U_{mq} \sin(\omega_q t + Y_q + j_q).$$

Входной ток двухполюсника

$$i_{kq} = i_k + i_q = I_{mk} \sin(\omega_k t + Y_k) + I_{mq} \sin(\omega_q t + Y_q),$$

где  $\omega_k, \omega_q$  – угловые частоты гармоник  $k$  и  $q$ ;  $Y_k, Y_q$  – начальные фазы гармоник напряжения;  $j_k, j_q$  – углы сдвига фаз гармоник напряжения относительно соответствующих гармоник тока.

Представим мгновенную мощность суммой четной  $p_c$  и нечетной  $p_s$  составляющих [6]:

$$p = u_{kq} i_{kq} = p_c + p_s. \tag{5}$$

Четная составляющая, содержащая постоянную и косинусоидальные функции, сохраняет положительный знак в течение периода  $T_p$  изменения мгновенной мощности и связана с пульсацией мощности относительно среднего значения – активной мощности  $P$ . Пульсации характеризуют изменение интенсивности преобразования электрической энергии, т.е. процесс обмена энергией между первичным источником и преобразователем (рассматривается случай создания гармоник в одном генераторе). Как отмечалось, указанные пульсации образуют первичные составляющие реактивной мощности преобразователя.

Нечетная составляющая, содержащая синусоидальные функции, меняет знак на временном интервале  $0, T_p$  и не имеет среднего значения, т.е. характеризует обмен энергией в системе «первичный источник, генератор, нагрузка» (рис. 1).

Разложим формулу (5) с учетом (2) и следующих связей:

$$p = (u_k + u_q)(i_k + i_q) = u_k i_k + u_q i_q + u_k i_q + u_q i_k = p_{kk} + p_{qq} + p_{kq} + p_{qk}, \tag{6}$$

где

$$p_{kk} = p_{ck} + p_{sk} = P_{kk} - p_{rk} + q_{xk} = P_{kk} - R_{kk} \cos 2(k\omega t + Y_k) + Q_{kk} \sin 2(k\omega t + Y_k);$$

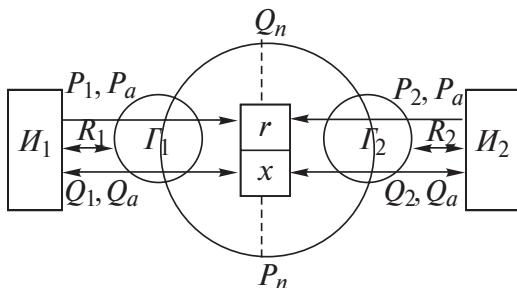


Рис. 2

$$p_{qq} = p_{cq} + p_{sq} = P_{qq} - p_{rq} + q_{xq} = P_{qq} - R_{qq} \cos 2(q\omega t + Y_q) + Q_{qq} \sin 2(q\omega t + Y_q);$$

$$p_{kq} + p_{qk} = p_{ckq} + p_{skq} = R_{kq} \cos((\omega_k - \omega_q)t + Y_k - Y_q) - R_{kq} \cos((\omega_k + \omega_q)t + Y_k + Y_q) + Q_{kq} \sin((\omega_k - \omega_q)t + Y_k - Y_q) + Q_{kq}^1 \sin((\omega_k + \omega_q)t + Y_k + Y_q) = p_{pkq}^- + p_{pkq}^+ + p_{akq}^- + p_{akq}^+;$$

$$P_{kk} = U_k I_k \cos j_k = r_k I_k^2 = R_{kk};$$

$Q_{kk} = U_k I_k \sin j_k = x_k I_k^2$  – активная и реактивные мощности цепи, а также генератора на  $k$ -й гармонике;

$$P_{qq} = U_q I_q \cos j_q = r_q I_q^2 = R_{qq};$$

$Q_{qq} = U_q I_q \sin j_q = x_q I_q^2$  – активная и реактивные мощности цепи и генератора на  $q$ -й гармонике;

$$R_{kq} = U_k I_q \cos j_k + U_q I_k \cos j_q;$$

$$Q_{kq} = U_q I_k \sin j_q - U_k I_q \sin j_k;$$

$$Q_{kq}^1 = U_q I_k \sin j_q + U_k I_q \sin j_k$$
 – амплитуды ре-

активных значений дополнительной мощности, связанной с возникновением колебаний на комбинационных частотах  $\omega_k - \omega_q$  и  $\omega_k + \omega_q$ , не равных  $2\omega_k$  и  $2\omega_q$ ;  $p_{pkq}^-, p_{pkq}^+, p_{akq}^-, p_{akq}^+$  – мгновенные значения дополнительной реактивной мощности генератора и дополнительной реактивной мощности цепи с частотами  $\omega_k - \omega_q, \omega_k + \omega_q$ , соответственно.

Запишем амплитуды значений дополнительной мощности с помощью входных сопротивлений двухполюсника  $z_k^2 = r_k^2 + x_k^2, z_q^2 = r_q^2 + x_q^2$  с учетом равенств  $U_k = z_k I_k, U_q = z_q I_q$ :

$$R_{kq} = r_k I_k I_q + r_q I_k I_q; Q_{kq} = x_q I_k I_q - x_k I_k I_q;$$

$$Q_{kq}^1 = x_q I_k I_q + x_k I_k I_q.$$

Аналогичные формулы можно получить при рассмотрении параллельного соединения элементов линейного двухполюсника:

$$y_k^2 = g_k^2 + b_k^2; y_q^2 = g_q^2 + b_q^2; I_k = y_k U_k; I_q = y_q U_q.$$

Постоянная составляющая суммы (5)  $P = P_{kk} + P_{qq}$  является активной мощностью цепи. Четные составляющие всех частей реактивной мощности  $R_{kk}, R_{qq}, R_{kq}$  обусловлены активными сопротивлениями двухполюсника, т.е., как отмеча-

лось, процессами изменения интенсивности преобразования энергии. Нечетные составляющие  $Q_{kk}$ ,  $Q_{qq}$ ,  $Q_{kq}$ ,  $Q_{kq}^1$  связаны с реактивными сопротивлениями цепи, т.е. характеризуют реактивные и дополнительные значения ее реактивной мощности.

Поскольку полученное разложение содержит ортогональные функции, запишем квадратичные значения полной мощности генераторов в виде:

$$S_{\Gamma}^2 = P^2 + R_{kk}^2 + R_{qq}^2 + Q_{kk}^2 + Q_{qq}^2 + 2R_{kq}^2 + Q_{kq}^2 + (Q_{kq}^1)^2 = P^2 + R_{kk}^2 + R_{qq}^2 + Q_{kk}^2 + Q_{qq}^2 + 2(Q_{pkq}^2 + Q_{akq}^2), \quad (7)$$

где  $Q_{pkq}^2 = R_{kq}^2 = (r_k + r_q)^2 I_k^2 I_q^2$ ,

$Q_{akq}^2 = (x_k^2 + x_q^2) I_k^2 I_q^2$  – квадратичные значения дополнительной реактивной мощности генератора и цепи соответственно.

Следовательно, квадрат полной мощности цепи при действии двух гармоник напряжения равен

$$S^2 = P^2 + Q_{kk}^2 + Q_{qq}^2 + 2Q_{akq}^2 = P^2 + Q^2 + 2(Q_{akq}^1)^2, \quad (8)$$

где  $Q = Q_{kk} + Q_{qq}$ ;  $(Q_{akq}^1)^2 = (x_k^2 - x_k x_q + x_q^2) I_k^2 I_q^2$ .

Преобразование, приводящее к суммированию значений реактивной мощности на разных частотах в (8, вторая строка), предложенное в [1], вряд ли целесообразно, поскольку теряется понятная связь временных функций и их интегральных характеристик, а также отсутствует физическое обоснование алгебраического суммирования интегральных характеристик синусоидальных функций разных частот.

Сравним равенства (8) с квадратом полной мощности цепи (1) при действии двух гармоник напряжения:

$$S^2 = (U_k^2 + U_q^2)(I_k^2 + I_q^2) = P_{kk}^2 + Q_{kk}^2 + P_{qq}^2 + Q_{qq}^2 + (z_k^2 + z_q^2) I_k^2 I_q^2 = (P_{kk} + P_{qq})^2 + Q_{kk}^2 + Q_{qq}^2 + ((r_k - r_q) + x_k^2 + x_q^2) I_k^2 I_q^2 = P^2 + Q^2 + D^2,$$

где  $D^2 = ((r_k - r_q)^2 + (x_k - x_q)^2) I_k^2 I_q^2$  – квадрат мощности искажения.

При равных частотах  $w_k = w_q$  составляющая  $D = 0$ , т.е. декомпозиция полной мощности соответствует (3) и однозначно связана с мгновенной мощностью. С появлением гармонических составляющих разложение, найденное перемножением действующих значений напряжения и тока, приво-

дит к выделению физически необъяснимой мощности  $D$ . Такой расчет полной мощности возможен после перехода к эквивалентным синусоидальным напряжению и току [7], однако значение полной мощности при этом определяется приближенно.

Составляющие полной мощности цепи в (8, первая строка) получены на основе анализа мгновенной мощности и могут использоваться для получения интегральных характеристик энергетических процессов.

**Расчет значений полной мощности при полигармонических колебаниях.** В общем случае при наличии  $n$  гармоник напряжения и тока на входе линейного двухполюсника мгновенная мощность

$$p = ui = \sum_k \dot{u}_k \sum_m \dot{i}_k = \sum_m p_m,$$

где  $m$  – номер гармоники мгновенной мощности.

Следовательно, общие формулы расчета квадратичных значений полной мощности цепи и генератора для случая  $2k^1 m$  имеют вид:

$$S^2 = \sum_k \dot{a}_k P_{kk}^2 + \sum_k \dot{a}_k Q_{kk}^2 + 2 \sum_{k^1 q} \dot{a}_k Q_{akq}^2; \quad (9)$$

$$S_{\Gamma}^2 = S^2 + \sum_k \dot{a}_k R_{kk}^2 + 2 \sum_{k^1 q} \dot{a}_k Q_{pkq}^2. \quad (10)$$

Составляющие дополнительной реактивной мощности цепи  $Q_{akq}$  участвуют в создании возможных дополнительных потерь на линии передачи, вызванных реактивной нагрузкой.

В ситуации, когда  $2k = m = w_k - w_q$  и (или)  $2q = m^1 = w_k + w_q$ , мгновенные дополнительные мощности суммируются с соответствующими значениями мгновенной мощности на гармониках  $2k$  и (или)  $2q$ . Например, при  $2k = m = w_k - w_q$  и (или)  $2q = m^1 = w_k + w_q$  мгновенные мощности

$p_m = p_{kk} + p_{pkq}^- + p_{akq}^- = P_{kk} - p_{rk} + p_{pkq}^- + q_{xk} + p_{akq}^-$  и (или)  $p_m^1 = p_{qq} + p_{pkq}^+ + p_{akq}^+ = P_{qq} - p_{rq} + p_{pkq}^+ + q_{xq} + p_{akq}^+$ , тогда формула (8) приобретет вид

$$S^2 = P^2 + Q_{akk}^2 + Q_{aqq}^2, \quad (11)$$

где  $Q_{akk}$ ,  $Q_{aqq}$  – амплитуды колебаний  $q_{xk} + p_{akq}^-$ ,  $q_{xq} + p_{akq}^+$ , соответственно.

Амплитудные значения колебаний первичной реактивной мощности генератора  $Q_{pkk}$ ,  $Q_{pqq}$  найдутся после суммирования колебаний  $p_{rk} + p_{pkq}^+$  и  $p_{rq} + p_{pkq}^+$ .

Коэффициент мощности при периодическом несинусоидальном режиме работы цепи

$$I = \sum_k \dot{a} P_k / S,$$

однако полная мощность определяется с помощью равенств (9) или (11).

Для сравнения выполнены расчеты коэффициента мощности  $I_k$  с помощью действующих значений токов и напряжений и  $I$  с использованием равенства (9). Если напряжение генератора содержит первую и третью гармоники, причем первая имеет частоту 50 Гц, а отношение амплитуд  $a = U_{m1} / U_{m3} = 3$ , то для активно-индуктивной нагрузки при  $r / x_1 = 1,73$  получим  $I_k = 0,84$ ;  $I = 0,75$ , а при  $a = 9$  значения  $I_k = 0,863$ ;  $I = 0,833$ .

По (7) и (10) можно оценить полную мощность преобразователя, если проектируется единая динамическая система «источник, генератор, нагрузка» ограниченной мощности. При этом целесообразно ввести коэффициент мощности генератора для учета первичных составляющих реактивной мощности.

При нелинейной нагрузке различие в спектрах напряжения и тока приведет к соответствующему изменению спектра мгновенной мощности двухполюсника. Однако возможность интегральной оценки этой мощности с помощью предложенного подхода остается, ибо сохраняется взаимно однозначное соответствие между временными функциями тригонометрического ряда мгновенной мощности и их интегральными характеристиками.

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 3, pp. 38–42.*

## An Analysis of Power Processes for Periodic Modes of Operation of Electrical Circuits

CHEREDNICHENKO Lemark Aleksandrovich (Baltik State Technical University, St. Petersburg, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*The article presents an analysis of power processes in a system “primary source of energy - generator - electric circuit” in apolyharmonic mode of its operation, from which the integral power performance characteristics of the generator and circuit were determined using instantaneous power. More clarity has been brought to the ideas about the physical process in the considered system by introducing additional reactive powers of the circuit and generator. The obtained correlation can be useful in study of energy-related processes in power circuits, in particular, when designing limited-capacity systems and in analyzing the distortion of signals in information circuits using energy-related estimates.*

**Key words:** *primary source of energy - generator - load, periodic operating modes, circuit power, integral characteristics, physical processes*

### REFERENCES

1. Krug K.A. *Osnovy elektrotehniki. Teoriya peremennykh tokov, t. 2* (Principles of electrical engineering. AC theory, vol. 2. Moscow, Leningrad; Publ. Gosenergoizdat, 1946, 636 p.
2. Tsitsikyan G.N. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2000, No. 8, pp. 34–41.
3. Solodukho Ya.Yu. *Tendentsiya kompensatsii reaktivnoi moshchnosti. Ch. 1. Reaktivnaya moshchnost' pri nesinusoidal'nykh rezhimakh raboty. — Elektrotehnicheskaya promyshlennost'. Ser. 05* (Trend of reactive power compensation. Part 1. Reactive power at non-sinusoidal modes. — Electrotechnical industry. Ser. 05). Moscow, Publ. Informelektro, 1987, 52 p.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круг К.А. Основы электротехники. Теория переменных токов, т.2.— М.; Л: Госэнергоиздат, 1946, 636 с.
2. Цицикян Г.Н. Работы Кваде и некоторые замечания по понятиям электрической мощности. — Электричество, 2000, № 8, с. 34–41.
3. Солодухо Я.Ю. Тенденция компенсации реактивной мощности. Ч.1. Реактивная мощность при несинусоидальных режимах работы. — Электротехническая промышленность. Полупроводниковые силовые приборы и преобразователи на их основе. Обзорная информация. — М.: Информэлектро, 1987, 52 с.
4. Пенфилд П., Спенс Р., Дюинкер С. Энергетическая теория электрических цепей. — М.: Энергия, 1974, с. 12–18.
5. Чередниченко Л.А. Интегральная оценка помехоактивности полупроводниковых преобразователей в цепях электропитания. — Санкт-Петербург: НТС «Гидроакустика» ФГУП ЦНИИ «Морфизприбор», 2000, вып. 2, с. 51–57.
6. Кувшинов А.А. Гармонический анализ мгновенной мощности пассивного двухполюсника. — Электричество, 2013, № 3, с. 54–59.
7. Демирчян К.С. Реактивная мощность на случай несинусоидальных функций. Ортомощность. — Изв. РАН. Энергетика, 1992, №1, с.15–38.

[25.10.15]

*Автор: Чередниченко Лемарк Александрович окончил электротехнический факультет Военно-инженерной академии им. А.Ф. Можайского в 1957 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1963 г. Доцент кафедры электротехники Балтийского государственного технического университета им. Д.Ф. Устинова.*

4. Penfild P., Spens R., Dyuinker S. *Energeticheskaya teoriya elektricheskikh tsepei* (Energy theory of electrical circuits). Moscow, Publ. «Energiya», 1974, pp. 12–18.
5. Cherednichenko L.A. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik «Gidroakustika»* (НИИ «Морфизприбор») — in Russ. (Scientific-technical collection «Gidroakustika» (Scientific and Research Institute «Morfizpribor», St. Petersburg)), 2000, iss. 2, pp. 51–57.
6. Kuvshinov A.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 3, pp. 54–59.
7. Demirchyan K.S. *Izvestiya RAN. Energetika — in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 1992, No. 1, pp. 15–38.

