

УДК 621.311

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ (ЭНЕРГИИ) В ЦЕПЯХ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

ГУЛИЕВ Г.Б.

Сумгаитский Государственный Университет

Повышение чувствительности современных технологий к искажению синусоидального характера изменения напряжения и тока требует совершенствования механизма ответственности за снижение качества электрической энергии. Актуальность проблемы обуславливает значительное число публикаций, в которых предлагаются различные методы расчета и измерения мощности и энергии в системах электроснабжения (СЭС) с нелинейной нагрузкой (НН).

При этом, зачастую, недостаточно полно учитываются особенности энергетических процессов в цепи переменного тока, пренебрегается предостережениями ряда авторов о последствиях их неучета, необоснованно применяются в расчетах отдельные рекомендации, приведенные в литературе по теоретическим основам электротехники. А поскольку на основе этих методов создаются измерительные приборы и устройства, заполняющих рынок, проблема снижения методической погрешности измерения мощности и энергии в СЭС приобретает большую актуальность. Трудности решения этой проблемы во многом обусловлены применением методов расчета, основанных на усреднении энергетических процессов, упрощения понятия мощности сети переменного тока.

Усреднение реального процесса приводит не только к потере информации об особенностях генерации и потреблении электрической энергии, но и приводит к соотношениям, лишенных физического смысла [1].

Из теоретических основ электротехники известно, что в цепи переменного тока мгновенное значение мощности основной гармоники напряжения и тока может быть вычислено по формуле

$$S_{1,1}(t) = u_1(t) \cdot i_1(t) = P_{1,1}(1 - \cos 2\omega t) + Q_{1,1} \sin 2\omega t$$

Представим эту формулу следующим образом:

$$S_{1,1}(t) = P_1 - [P_{1,1} \sin(2\omega t - 90^\circ) - Q_{1,1} \sin 2\omega t]$$

Из математики также известно, что сумма (разность) двух синусоидальных функций с амплитудами A_1 и A_2 и углами сдвига ψ_1 и ψ_2 есть так же синусоидальная функция, т.е.

$$A_1 \sin(k\omega t + \psi_1) + A_2 (\sin k\omega t + \psi_2) = A_\Sigma \sin(k\omega t + \psi_\Sigma)$$

где

$$A_\Sigma = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\psi_2 - \psi_1)}$$

$$\operatorname{tg} \psi_\Sigma = \frac{A_1 \sin \psi_1 + A_2 \sin \psi_2}{A_1 \cos \psi_1 + A_2 \cos \psi_2}$$

При $A_1 = P_{1,1}$, $A_2 = -Q_{1,1}$, $\psi_1 = -90^\circ$, $\psi_2 = 0$ и $A_\Sigma = G_{1,1}$

$$S_{1,1}(t) = P_1 - G_{1,1} \sin(z\omega t + \psi_\Sigma) = P_1 - G_{1,1}(t) \quad (2)$$

где

$$G_{1,1} = \sqrt{P_{1,1}^2 + Q_{1,1}^2 + 2P_{1,1}Q_{1,1} \cos 90^\circ} = \sqrt{P_{1,1}^2 + Q_{1,1}^2} \quad (3)$$

$$\operatorname{tg}\psi_{\Sigma} = \frac{P_{1,1}}{Q_{1,1}} = \operatorname{ctg}\varphi \quad (4)$$

φ - угол сдвига между векторами напряжения и тока.

$$S_{1,1\max} = P_1 + G_{1,1} \quad (5)$$

$$S_{1,1\min} = P_1 - G_{1,1} \quad (6)$$

Таким образом:

1. Мощность в цепи переменного тока в произвольный момент времени $S_{1,1}(t)$ равна сумме двух составляющих:

1.1. Постоянной (на интервале основной гармоники T_1) положительной активной мощности P_1 ;

1.2. Синусоидально изменяющейся полной мощности $G_{1,1}(t)$.

2. Квадратическая зависимость существует между $G_{1,1}$, $P_{1,1}$ и $Q_{1,1}$ (см. формулу 3).

3. В соответствии с п.1. генерируемая (потребляемая) электрическая энергия также может быть представлена суммой двух составляющих:

3.1. Активная энергия. Количественно полностью характеризуется величиной $W_P(t) = \int_0^t P_1(\tau) d\tau = T_1 \sum_{i=1}^{t/T_1} P_i$. Эта энергия преобразуется в нагрузку в другие виды энергии (например, в тепловую или механическую).

3.2. Вторая составляющая энергии $W_{G,1}(t)$ не менее значима и специфична. Она обеспечивает необходимые условия преобразования активной энергии в нагрузку, характеризует неравномерность генерации (потребления) электрической энергии, зависит от реактивного сопротивления цепи переменного тока. Суммарное ее значение на интервале T_1 равно нулю. Многозначность этой энергии обуславливает целесообразность ее дифференцирования на активную и реактивную составляющие.

Активная составляющая характеризует лишь неравномерность генерации (потребления) активной энергии. На каждой четверти периода T_1 активная энергия периодически изменяется на величину.

$$W_{P,1}^{(+)}(T_1/2) = W_{P,1}^{(-)}(T_1/2) = \frac{2P_{1,1}}{\omega_2} = \frac{P_{1,1} \cdot T_1}{2\pi} = W_{P,1}(T_1/2) = \frac{W_P(T_1)}{2\pi}$$

Поскольку реактивное сопротивление в цепи переменного тока СЭС преимущественно носит индуктивный характер, реактивная составляющая энергии $W_{G,1}(t)$ в момент t в СЭС характеризует энергию магнитного поля индуктивного сопротивления. На интервале T_1 суммарное значение реактивной энергии равно нулю.

Особенности изменения реактивной энергии на интервале T_1 позволяют представить ее «генерируемой (потребляемой)» частью $W_{Q,1}^{(+)}(T_1/2)$, равной площади положительной полуволны синусоиды $Q_{1,1}(t) = Q_{1,1} \sin(2\omega t + \varphi)$ и равной ей по величине и противоположной по знаку «возвращаемой» частью $W_{Q,1}^{(-)}(T_1/2)$,

$$W_{Q,1}^{(+)}(T_1/2) = W_{Q,1}^{(-)}(T_1/2) = \frac{Q_{1,1} \cdot T_1}{2\pi} = W_{Q,1}(T_1/2)$$

При этом

$$W_{G,1}(T_1/2) = \sqrt{W_{P,1}^2(T_1/2) + W_{Q,1}^2(T_1/2)} \quad (7)$$

и полностью согласуется с (3).

Для количественной характеристики энергетического процесса в СЭС при решении практических задач используется ряд показателей осуществляющих контроль эффективности электроснабжения. Наглядным примером является коэффициент мощности, осуществляющий текущий контроль требуемой пропускной способности по условию нагрева элементов сети. Повышение эффективности достигается измерением

реактивной энергии и последующего применения к этой величине механизма тарифов. И хотя хорошо известно, что суммарное значение реактивной энергии на каждом интервале T_1 равно нулю, принцип суммирования генерируемой части реактивной энергии показал свою работоспособность и будет использован нами для расчета суммарной энергии высших гармоник.

В несинусоидальном режиме энергетические процессы в электрических цепях переменного тока СЭС имеют свои особенности. Эти особенности обуславливаются изменением синусоидального характера напряжения на шинах распределительных устройств (РУ) и тока в цепи нагрузки. Высоковольтные СЭС преимущественно трехфазны. В настоящей статье рассматриваются методические особенности расчета и измерения мощности (энергии) в цепях с симметричной нелинейной нагрузкой, когда электрические явления в каждой фазе аналогичны явлениям в однофазных цепях. Несимметрия нагрузок вносит свои особенности в протекание электрического процесса (зависимость от характера изменения нагрузки, неравномерность искажения синусоидальности по фазам, увеличение потерь и пр.). Однако рекомендуемые способы оценки МИ и ЭИ остаются неизменными. Для количественной характеристики допустимых значений искажения синусоидальности ГОСТ 13109-97 регламентирует коэффициент искажения синусоидальности напряжения и коэффициенты гармоник, число которых превышает десятки и определяется числом учитываемых гармоник ($n_m=40$). Если учесть неоднократно отмечаемую в литературе целесообразность применения (успешно используются в нормативах ряда международных стандартов качества электроэнергии) показателей искажения синусоидальности тока в цепи, а также нормально допустимые и предельно допустимые значения показателей, то оказывается, что число показателей для количественной характеристики одного из разновидностей качества электроэнергией СЭС- несинусоидальности, превышает 10^2 . Более того, они не всегда объективны, поскольку не учитывает эффект взаимной частичной компенсации тока (напряжения) различных гармоник (ВЧКГ), ограничивающий их влияние. Например, хорошо известно, что сумма амплитуд напряжений (токов) отдельных гармоник существенно выше максимального значения несинусоидального напряжения на шинах подстанции (тока в цепи). Иначе говоря, коэффициенты n -ной гармоники напряжения недостаточно полно характеризуют искажение синусоидальности кривых $u(t)$, а эффект от компенсации одной из наиболее значимых гармоник напряжения может оказаться недостаточным, поскольку влияния смежных (нечетных) и кратных им гармоник возрастает. Максимальный эффект может быть получен лишь путем анализа изменения суммарной энергии высших гармоник. Не учитывает ВЧКГ и коэффициент искажения синусоидальности напряжения. В этой связи естественно стремление перехода к показателям, которые наиболее полно и интегрально характеризуют энергетический процесс несинусоидального режима СЭС - к показателям мощности и энергии. По аналогии с показателями коэффициент мощности и реактивная энергия для электрической энергии основной гармоники, показатели несинусоидальности по ГОСТ 13109-97 и показатели мощности и энергии высших гармоник взаимно дополняя друг друга должны использоваться для контроля (первые) и управления (вторые) качеством электроэнергии в СЭС.

Чтобы различить $G_{1,1}$ и $W_{G,1}(T_1)$ от соответствующей мощности и энергии высших гармоник (обозначим их через D_G и $W_{D,G}(T_1)$), будем называть D_G мощностью искажения (МИ), а $W_{D,G}(T_1)$ -энергией искажения (ЭИ). Эти термины соответствуют и физической сущности последствий воздействия МИ, искажающей синусоидальный характер $G_{1,1}(t)$.

Характер изменения энергетического процесса несинусоидального режима, прежде всего, определяется типом источника гармоник. Простейшие структурные

схемы электроснабжения с различными источниками гармоник, с указанием расчетных точек измерения мощности и энергии (шины РУ) и особенностей распределения потоков энергии, соответствующих активной мощности P_1 , переменной составляющей мощности основной гармоники $G_{1,1}(t)$ и мощности высших гармоник $D_G(t)$, приведены на рис. 1а-е.

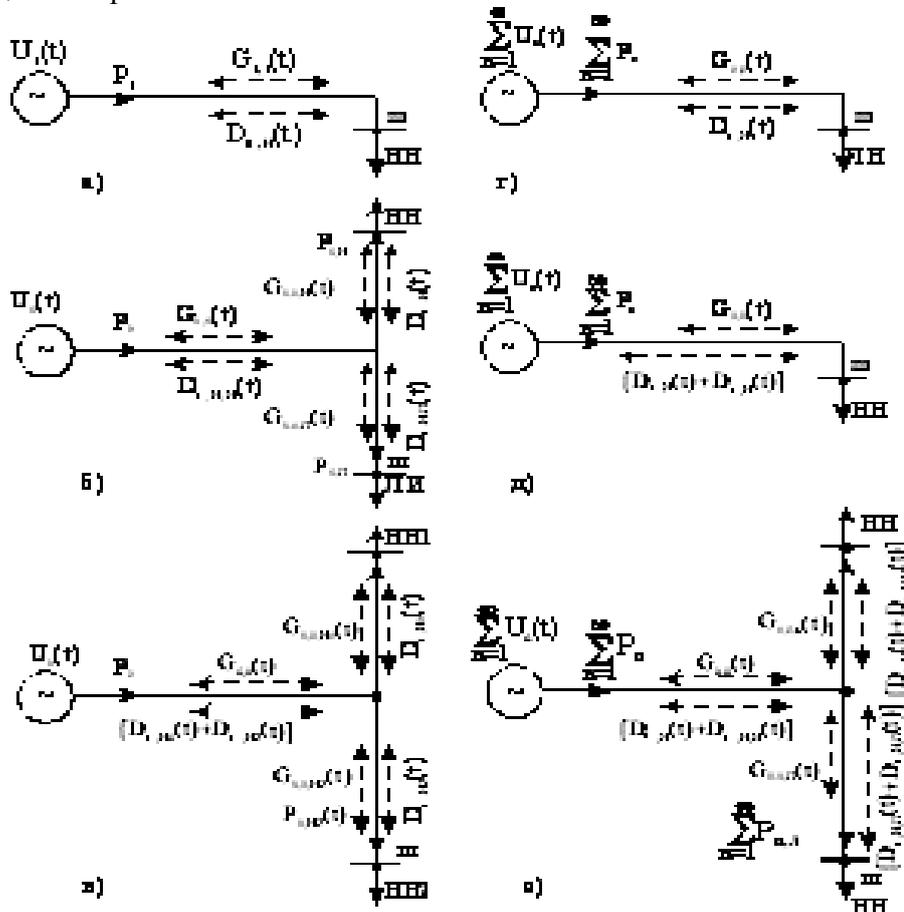


Рис.1. Типовые структурные схемы электроснабжения с источниками высших гармоник

В качестве источников гармоник рассмотрены НН (электротехнологическая установка с нелинейной вольтамперной характеристикой) и источник активной энергии. Схемы а, б, в характерны для СЭС больших энергетических систем, а схемы г, д, и е – для автономных энергосистем специального назначения (отдельные морские газонефтяные основания, судовой транспорт и др.).

Схема рис. 1в аналогична схеме рис.1а, т.к. между НН1 и НН2 высшие гармоники тока практически не протекают, что объясняется существенным превышением внутреннего сопротивления НН для высших гармоник сопротивления в цепи источника активной мощности.

Само измерение мощности и энергии в расчетных точках включает: измерение активной мощности P_1 (энергии – $W_{P,1}(t)$); измерение реактивной мощности – Q_{11} (энергии – $W_{Q,1}(t)$); измерение суммарной МИ- $D_{G,\Sigma}$ (ЭИ- $W_{D,\Sigma,G}(t)$).

Учитывая, что э.д.с. источников активной мощности (генераторов электростанций) практически синусоидальна, измерение потребляемой энергии активной мощности (в расчетных точках схем 1а,б,в) должно проводиться по формуле (8) при $n=1$. Измерение энергии по формуле

$$W_{P,1}^*(T_1) = \int_0^{T_1} u(t) \cdot i(t) dt = T_1 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n = T_1 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (8)$$

приводит к систематической методической погрешности измерения, поскольку величины U_n с $n = 2, \infty$ характеризуют не напряжение, вызывающее ток I_n , а напряжение, обусловленные падением напряжения на внутреннем сопротивлении НН Z_n , при протекании тока I_n , что естественно не одно и то же [2]. Величина этой погрешности равна

$$\delta W_{P,1}(T_1) = \frac{1}{P_1} \sum_{n=2}^{\infty} P_n \quad (9)$$

а потребитель дополнительно оплачивает за неиспользованную электроэнергию, равную $\Delta W_{P,1}(T_1) = T_1 \sum_{n=2}^{\infty} P_n$ и тем большую, чем сильнее искажение синусоидальности напряжения и тока. Таким образом, потребитель с линейной нагрузкой не только получает некачественную электроэнергию, но должен еще и платить больше.

Если же э.д.с. источника активной мощности несинусоидальная, то измерение $W_{P,1}$ по формуле (8) может проводиться лишь для схемы 1,г [3]. В схемах 1,д и 1,е напряжение на шинах и ток в цепи являются геометрической суммой векторов одноименных гармоник обоих источников высших гармоник и применение формулы (8) вносит определенную методическую погрешность.

Измерение потребляемой реактивной энергии в расчетных точках для всех схем рис.1 должно приводиться по величинам действующих значений напряжения и тока основной гармоники и угла сдвига между этими величинами. Измерение реактивной энергии по формуле

$$W_{Q,1}^*(T_1) = T_1 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n = T_1 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (10)$$

содержит три разновидности методической погрешности:

На самом деле, потребляемая нагрузкой реактивная энергия равна не произведению реактивной мощности на время, а в $\pi=3,14$ раза меньше [4];

Обусловленная отмеченными выше особенностями возникновения несинусоидального напряжения на шинах РУ с подключенной НН. Эта погрешность также ведет к увеличению расчетной величины реактивной энергии и по аналогии с формулой (9), численно равна

$$\delta W_{Q,1}(T_1) = \frac{1}{Q_{1,1}} \sum_{n=2}^{\infty} Q_n \quad (11)$$

а потребитель дополнительно оплачивает за реактивную энергию

$$\Delta W_{Q,1} = T_1 \sum_{n=2}^{\infty} Q_n \cdot$$

Вызванная недопустимостью сложения амплитудных значений реактивной мощности, поскольку эти величины различаются углами сдвига относительно амплитуды основной гармоники и знаком [2,3].

Если учесть эти погрешности и величины тарифов на активную и реактивную энергию, то окажется, что стоимость 1МВар·ч реально потребляемой реактивной энергии предприятием приближается к стоимости 1 МВт·ч активной энергии.

Чтобы оценить значимость ЭИ гармоник, не превышающих нормативные значения были приведены расчеты ЭИ на интервале T_1 при реальных углах сдвига гармоник относительно начала координат (данные измерения) и скорректированных амплитудах

гармоник тока, вычисляемых по формуле $I_n^* = I_n \frac{K_{U(n)}^{н.д.}}{K_{U(n)}}$ при условии, что $K_{U(n)} > K_{U(n)}^{н.д.}$ и

$I_n^* = I_n \frac{K_{U(n)}^{н.д.}}{K_{U(n)}}$ при условии, что $K_{U(n)} > K_{U(n)}^{н.д.}$. Где, $K_{U(n)}^{н.д.}$ и $K_{U(n)}^{н.д.}$ - соответственно,

нормально и предельно допустимые значения коэффициента n-ной гармонической составляющей напряжения с $n = 2, \overline{n_m}$. Очевидно, что оценки ЭИ при этих условиях будут предельно возможными. Иначе говоря, при соответствии несинусоидальности напряжения предъявляемым требованиям, действительная ЭИ не будет повышать расчетное. Результаты вычислений приведены на рис.2.

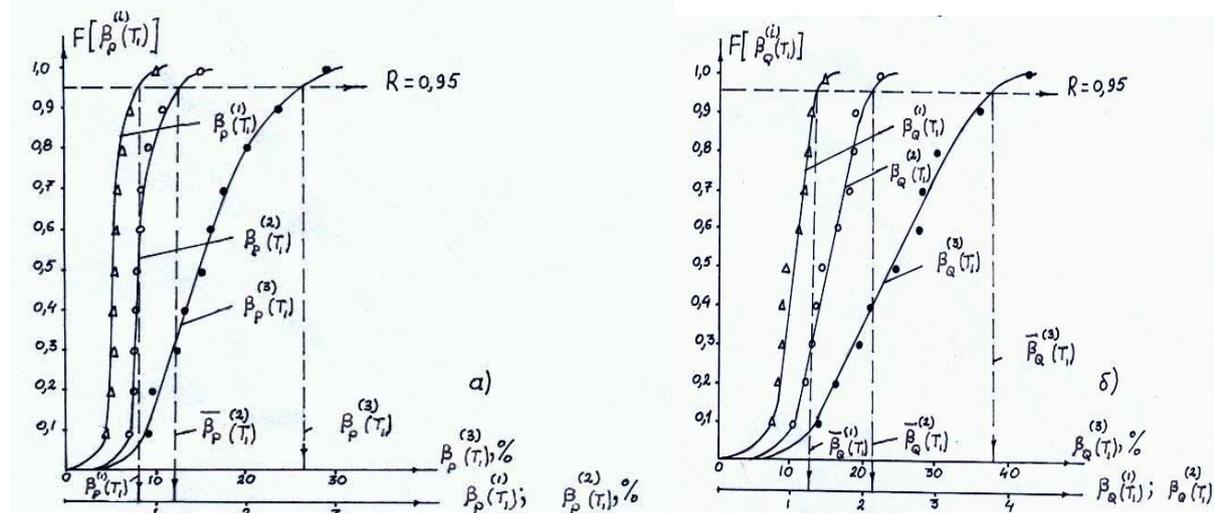


Рис.2. Статические функции распределения коэффициентов искажения основной гармоники 1-активная составляющая; 2-реактивная составляющая

1 - $K_{U(n)} \leq K_{U(n)}^{н.д.}$; 2 - $K_{U(n)} \leq K_{U(n)}^{н.д.}$; 3-реальные значения $K_{U(n)}$

Как следует из рис.2. верхнее граничное значение доверительного интервала коэффициента искажения активной составляющей $G_{1,1}(T_1)$ основной гармоники $\bar{\beta}_p(T_1)$ при $K_{U(n)} = K_{U(n)}^{н.д.}$ с $R=0.95$ не превышает 0,75% от $W_{1,1,p}$ при среднем значении $M^*(\beta_p(T_1)) = 0,55\%$ при $K_{U(n)} = K_{U(n)}^{н.д.}$ верхнее граничное значение доверительного интервала равно $\bar{\beta}_p(T_1) = 1,25\%$ при среднем значении $M^*(\beta_p(T_1)) = 0,7\%$, в то время как реальные значения $\bar{\beta}_p(T_1)$ и $M^*(\beta_p(T_1))$ в узле с НН составляли, соответственно, 27% и 16%. Таким образом, величина активной составляющей ЭИ может быть с успехом использована в механизме обеспечения ответственности потребителя за снижение качества активной энергии. Аналогичное по характеру заключение может быть сделано и для реактивной составляющей ЭИ.

Проведенные авторами экспериментальные исследования [2-4] позволили заключить:

- НН в СЭС преобразует часть потребляемой энергии $W_{G,1}(t)$ в ЭИ высших гармоник $W_{D,G}(t)$;
- генерируемая НН МИ, не изменяя величины потребляемой активной мощности, искажает синусоидальный характер $G_{1,1}(t)$.

Рамки настоящей статьи не позволяют сделать следующий шаг: ответить на вопрос, а как ее измерить и учесть ЭИ. Отметим лишь, что методология этого измерения разработана и апробирована как неотъемлемая часть разработанного авторами автоматизированного вычислительного комплекса для анализа и контроля

показателей несинусоидального и несимметричного режимов по данным о мгновенных значениях величины тока и напряжения в цепи.

Проведенные авторами экспериментальные исследования [2-6] позволили заключить:

- НН в СЭС преобразует часть потребляемой энергии $W_{G,1}(t)$ в ЭИ высших гармоник $W_{D,G}(t)$;

- генерируемая НН МИ, не изменяя величины потребляемой активной мощности, искажает синусоидальный характер $G_{1,1}(t)$.

Рамки настоящей статьи не позволяют сделать следующий шаг: ответить на вопрос, а как ее измерить и учесть ЭИ. Отметим лишь, что методология этого измерения разработана и апробирована как неотъемлемая часть разработанного авторами автоматизированного вычислительного комплекса для анализа и контроля показателей несинусоидального и несимметричного режимов по данным о мгновенных значениях величины тока и напряжения в цепи.

-
1. *Демирчян К.С.* Реактивная мощность на случай несинусоидальных функций. Ортомощность. // Энергетика, 1992, N1, с.15-38.
 2. *Фархадзаде Э.М., Гулиев Г.Б.* Расчет показателей несинусоидального режима узла нагрузки. //Электричество. М., 2002, №8, с.20-25.
 3. *Фархадзаде Э.М., Гулиев Г.Б.* Мощность и энергия искажения в однофазных цепях с линейной нагрузкой. - Проблемы энергетики. Баку, 2003, №3, с.30-36
 4. *Farhadzadeh E.M., Guliyev H.B.* Parallel work of sources of energy of distorting. Proceeding of the sixth. Baku international Congress «Energy, Ecology, Economy», Baku, May 30-June 3, 2002, 180-188

QEYRI-XƏTTİ YÜKLÜ DÖVRƏLƏRDƏ GÜCÜN (ENERJİNİN) HESABLANMASI VƏ ÖLÇÜLMƏSİNİN METODİK XÜSUSİYYƏTLƏRİ

QULİYEV H.B

Qeyri-xətti yüklü dövrlərdə aktiv və reaktiv gücün (enerjinin) hesabi və ölçülməsinin obyektivliyinin artırılması problemi mütəxəssisləri daha çox cəlb edir. Bunun səbəbi qeyri-xətti yüklərin güclərinin artması, gərginlik və cərəyanın sinusoidallığının təhrifinə müasir texnologiyaların həssaslığının yüksəlməsi, tariflər mexanizminin köməyi ilə elektrik enerjisinin keyfiyyətinin idarə sisteminin təkmil olmamasındadır.

METHODICAL SINGULARITIES OF ACCOUNT AND MEASUREMENT OF POWER IN CIRCUITS WITH A NONLINEAR LOAD

GULIYEV H.B.

Problem boosting of objectivity account and measurement active and in circuits with a nonlinear load draws of a reactive power the increasing notice of technicians. A reason to that is body height of power of nonlinear loads, a sensitization of modern process engineering to distortion sinusoidal voltages and a current, imperfection a management system of quality electric power by means of the gear of fares.