

УДК 621.313

## РАЗВИТИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

*Мамчур Д.Г., ассистент, Калинов А.П., к.т.н., доц.*

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского  
39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20*

*E-mail: [scenter@polytech.poltava.ua](mailto:scenter@polytech.poltava.ua)*

В статье рассмотрен вопрос возможности оценки технического состояния асинхронных электродвигателей на основании показателей качества преобразования энергии. В результате исследований сделан вывод о необходимости дополнения комплекса существующих показателей, а также предложено ввести новый показатель, основанный на анализе отдельных гармоник мгновенной мощности.

**Ключевые слова:** показатели качества преобразования энергии, мгновенная мощность, техническое состояние.

In the article the problem of a possibility of an evaluation of availability index of product of asynchronous electric motors, grounded on parameters of quality of transformation of energy is considered. In an outcome of researches the conclusion about necessity of addition of a complex of existing parameters is made, and also offered to enter a new parameter, based on the analysis of separate harmonics of an instantaneous potency.

**Key words:** parameters of quality of transformation of energy, instantaneous potency, availability index of product.

**Введение.** В связи с необходимостью внедрения энергоресурсосберегающих технологий в производственный процесс, возникает задача оценки энергетических режимов работы электромеханических преобразователей, в частности, асинхронных электродвигателей (АД). В настоящее время регламентируется лишь влияние качества питающей электрической энергии на электромеханический преобразователь [1–3], при этом считается, что он исправен, электрически и магнитно симметричен. В работах ряда исследователей [4, 10] показано, что существующие методы оценки энергоэффективности работы электрических машин морально устарели вследствие увеличения количества электроприводов переменного тока, работающего при несинусоидальной степени исходной или приобретенной конструктивной параметрической несимметрии. Необходимость разработки и внедрения новых методов оценки как энергоэффективности работы, так и технического состояния электромеханических преобразователей, обусловлена следующими причинами:

- ввиду несинусоидальности токов и напряжений и неоднаправленности потоков энергии оценка энергоэффективности работы электромеханического оборудования на основе КПД и коэффициента мощности является неадекватной;
- отсутствуют четкие нормативные и экономические рычаги для стимулирования энергоресурсосбережения;
- проведение операций диагностики и мониторинга электромеханического оборудования как в стационарных, так и в полевых условиях базиру-

ется на упрощенных зависимостях и математических моделях без учета энергетического режима работы;

- существует необходимость определения остаточного ресурса электромеханического оборудования для повышения эффективности ведения энергохозяйства;
- существует необходимость регламентирования качества выполнения технологических операций электроприводом и оценки негативных влияний качества преобразователя энергии на питающую сеть и обслуживающий персонал.

**Цель работы** – обоснование и введение дополнительных показателей качества преобразования энергии для диагностики технического состояния электромеханического оборудования.

**Материал и результаты исследований.** В работе [4] было введено понятие показателей качества преобразования энергии (ПКПЭ). В работах [5, 6] были сформированы отдельные ПКПЭ, которые условно можно разделить на коэффициенты, основанные на анализе потребляемой мощности, тока и электромагнитного момента АД.

Так, к первой группе показателей относится коэффициент эффективности использования потребляемой энергии, характеризующий машину как в целом, так и пофазно:

$$\varepsilon_p = \frac{P_0(t)}{P_3(t)} 100\% \quad - \quad \text{обобщенный коэффициент,}$$

характеризующий некачественность преобразования в целом;

$\epsilon_{pi} = \frac{P_{0i}(t)}{P_3(t)} 100\%$  –коэффициент, характеризующий

некачественность преобразования пофазно,

где  $i = A, B, C$ ,  $P_0(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_i P_i(t) dt$  – среднее значение

мощности трёх фаз;  $P_{0i}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T P_i(t) dt$  –

среднее значение мощности фазы;

$P_3(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_0(t))^2 dt}$  – эквивалентное значение

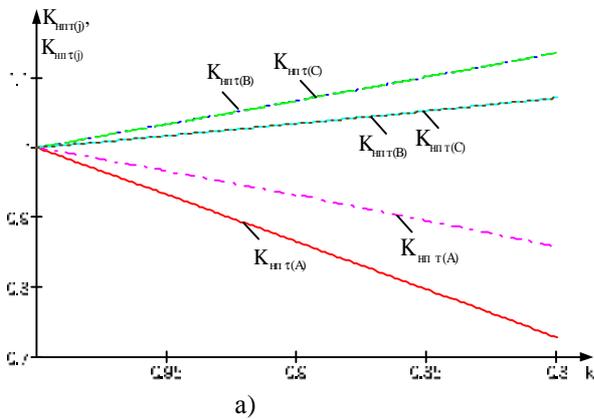
мощности двигателя.

Данный коэффициент, в пофазном варианте, может использоваться как аналог коэффициента мощности для системы с несинусоидальными токами и напряжениями (рис. 1). Для трехфазной системы этот коэффициент отражает соотношение переменной составляющей мгновенной потребляемой мощности и среднего значения этой мощности.

Коэффициенты, относящиеся ко второй группе:

$$K_{\text{нп}\tau(j)} = \frac{3 \cdot \sqrt{\sum I_n^2(j)}}{\sqrt{\sum I_n^2(A) + \sum I_n^2(B) + \sum I_n^2(C)}} - \text{токовой}$$

загрузки фаз;



$$K_{\text{нп}\tau(j)} = \frac{3 \cdot \sum I_n^2(j) R_A}{\sum I_n^2(A) R_A + \sum I_n^2(B) R_B + \sum I_n^2(C) R_C} -$$

неравномерности тепловыделения в обмотках статора. Анализ показал применимость данного коэффициента для выявления токовой и тепловой несимметрии машины: при фазной симметрии коэффициенты равны по всем фазам единице; для несимметричной фазы они уменьшаются, в то время как для остальных фаз – увеличиваются (рис. 2).

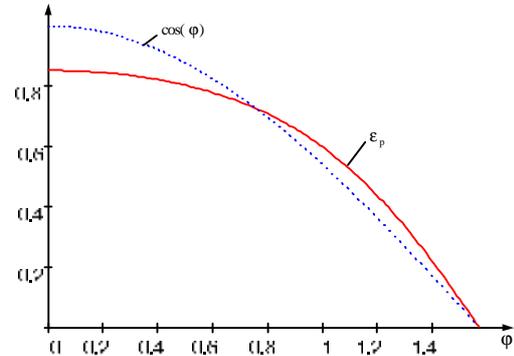


Рисунок 1 – Сравнение обобщённого коэффициента эффективности использования потребляемой энергии и  $\cos(\varphi)$

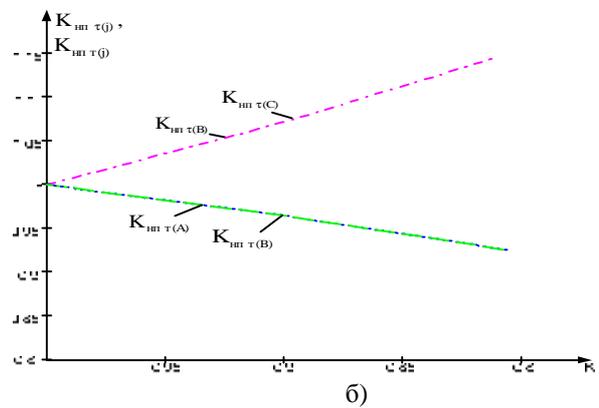


Рисунок 2 – Коэффициенты неравномерности тепловыделения и токовой загрузки при:  
а –  $R_a=R_b=R_c, I_a=(1..0,8)I_b, I_b=I_c$ ; б –  $R_a=0.9R_b, R_b=R_c$

Показатели, базирующиеся на анализе составляющих электромагнитного момента:

$K_{\text{нп}M} = 1 - \frac{M_0}{M_d}$  – коэффициент преобразования

момента;

$$K_{\text{нп}V} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N M_k^2}}{\sqrt{M_0^2 + \sum_{k=1}^N M_k^2}} - \text{коэффициент ухудшения}$$

вибрационных характеристик;

$$k_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N M_k^2}}{\sqrt{2}M_0} - \text{коэффициент вариации момента};$$

где  $M_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(t_i)$  – постоянная составляющая

электромагнитного момента;  $M_d = \sqrt{M_0^2 + \sum_{k=1}^N M_k^2}$  –

среднеквадратичный момент;  $M_k$  – амплитуда момента  $k$ -й гармоники.

По данным показателям можно судить о влиянии

вибрационных характеристик электрической машины на процесс преобразования энергии. Их анализ показал, что выдвинутым выше требованиям для ПКПЭ частично удовлетворяют коэффициент преобразования момента и коэффициент ухудшения вибрационных характеристик, в то время как коэффициент вариации момента в режимах, близких к холостому ходу, может стремиться к бесконечности, т.е. не иметь чётко определённых границ и характерных точек (рис. 3). Исследования данной группы коэффициентов на математических моделях показали возможность их применения для определения ухудшения вибрационных характеристик АД например, при развитии дисбаланса ротора [7]. Однако, существенным недостатком приведённых коэффициентов является наличие в выражениях среднего момента  $M_0$ , отвечающего за уровень момента нагрузки на валу двигателя. Таким образом, значения коэффициентов значительно изменяются при изменении нагрузки.

Рассмотренные коэффициенты, по сути, базируются на интегральных величинах, полученных на основе мгновенных значений электромагнитного момента. Это свидетельствует о том, что рассматриваемые коэффициенты могут быть использованы для оценки эффективности целенаправленного преобразования и использования потребляемой энергии, однако, для целей диагностики являются практически неприменимыми.

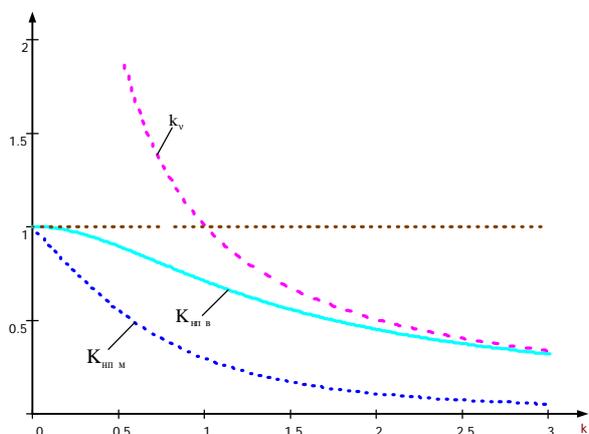


Рисунок 3 – Коэффициенты некачественности преобразования момента, ухудшения вибрационных характеристик и вариации момента

Основой для расчета приведённых ПКПЭ при анализе энергетических режимов электромеханического оборудования (ЭМО) являются мгновенные значения сигналов токов, напряжений и мощности. Удобство анализа сигнала мгновенной мощности обусловлено возможностью оперирования её составляющими как для пофазного варианта, так и для трёхфазного [8]. Кроме того, потребляемая мгновенная мощность может быть однозначно получена.

При определении показателей качества преобразования энергии (ПКПЭ) следует придерживаться следующих требований:

- прозрачный и чёткий смысл коэффициентов;
- однозначная связь с определёнными видами дефектов;
- чёткие граничные значения и обоснованные характерные значения (завышенное значение – большая стоимость технических мероприятий, заниженное значение – низкое качество технологии, низкая энергоэффективность, ущерб);
- наблюдаемость исходных данных для коэффициентов.

Для анализа составляющих мгновенной мощности была создана компьютерная программа, позволяющая моделировать мгновенные значения полигармонических сигналов тока и напряжения трёхфазной системы, амплитудную и фазную несимметрию трёхфазной системы, несинусоидальность токов и напряжений. Алгоритм работы представлен на рис. 4, а. Программа работает следующим образом. На основании полученных мгновенных значений токов и напряжений рассчитываются мгновенные мощности каждой фазы, а также суммарная мгновенная мощность трёхфазной системы. Далее к указанным сигналам применяется аппарат быстрого преобразования Фурье; на основании косинусных и синусных составляющих гармоник токов и напряжений фазы, применяя к ним аппарат дискретной свёртки согласно методике, описанной в [9], рассчитываются символьные выражения формирования косинусных и синусных составляющих гармоник мгновенной мощности фазы (рис. 4, б); рассчитываются символьные выражения формирования составляющих гармоник полной мощности трёхфазной системы.

При исследованиях моделирование проводилось для следующих случаев:

- система симметрична, токи и напряжения синусоидальны;
- система симметрична, токи или напряжения (либо и токи и напряжения) несинусоидальны (присутствует 3-я, либо 3-я и 5-я гармоники);
- система несимметрична (фазная или амплитудная несимметрия), токи и напряжения синусоидальны;
- система несимметрична, токи или напряжения (либо и токи и напряжения) несинусоидальны.

В результате работы программы получают символьные выражения формирования гармонических составляющих мгновенной мощности каждой фазы и всей системы на основании гармонических составляющих токов и напряжений. Интерфейс программы представлен на рис. 5.

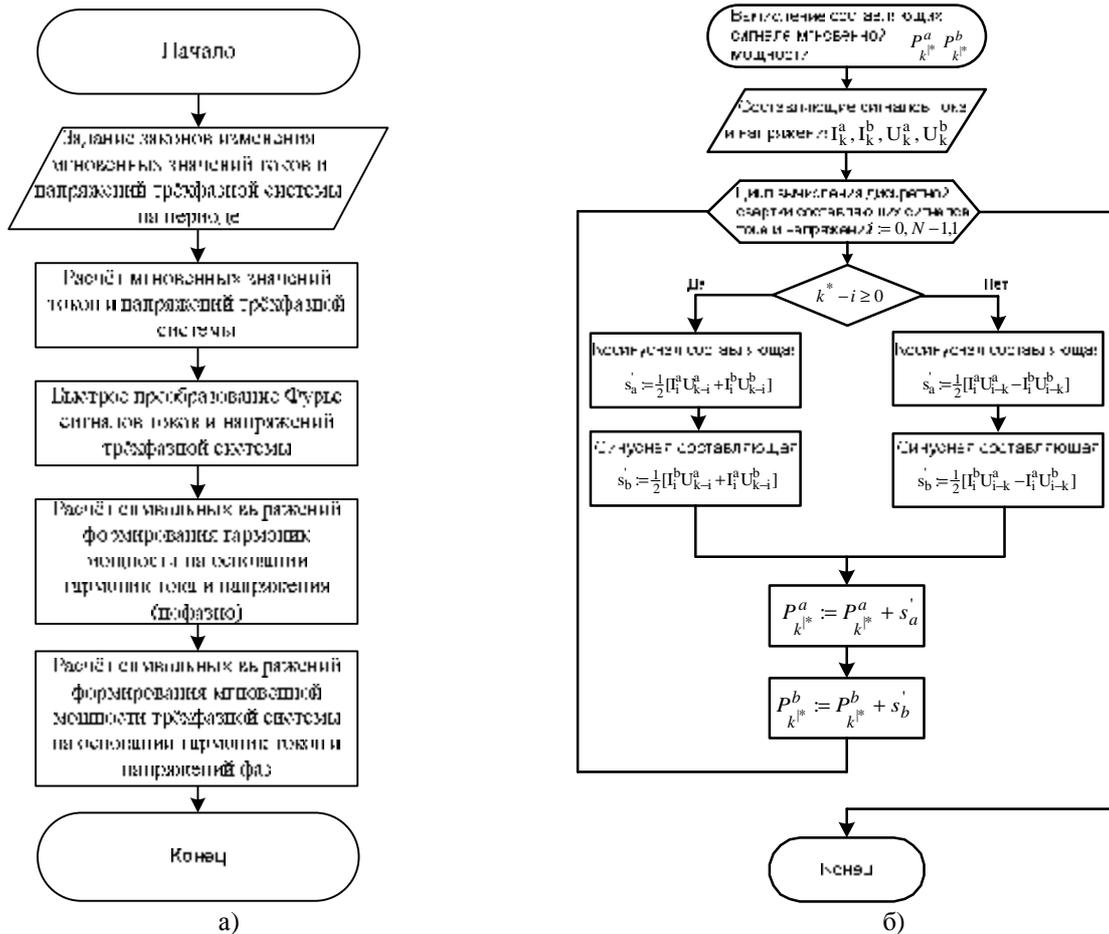


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритму програми аналізу гармонічного складу електричних сигналів в тріфазній системі (а) і підпрограма розрахунок символічних виразів для гармонік потужності фази (б):

$P_{k^*}^a$ ,  $P_{k^*}^b$  – косинусна і синусна складові сигналу моментальної потужності;  $I_k^a$ ,  $I_k^b$ ,  $U_k^a$ ,  $U_k^b$  – косинусні і синусні складові сигналів струму і напруги;  $k, k^*$  – номери членів ряду

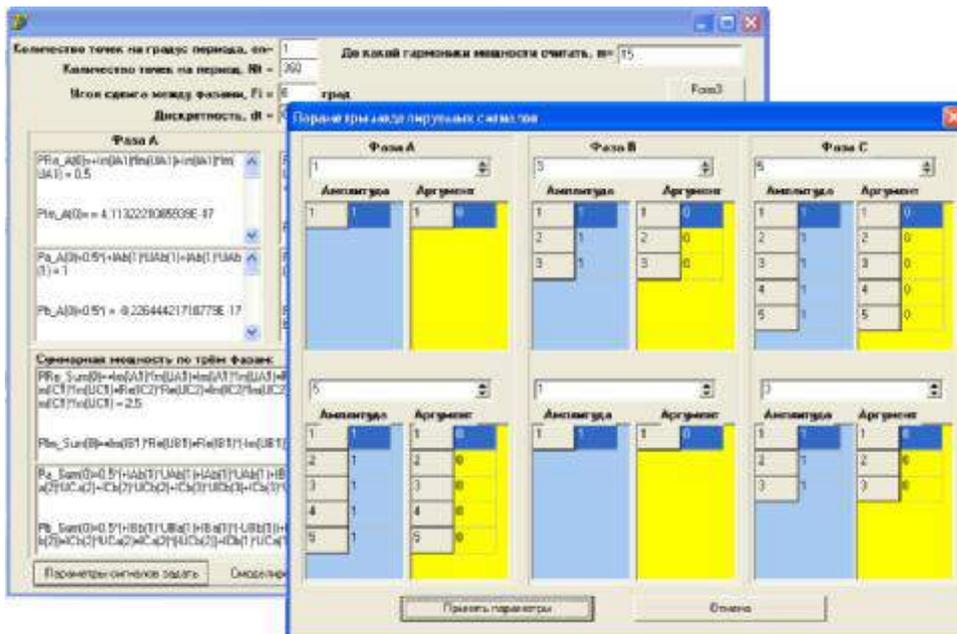


Рисунок 5 – Інтерфейс програми розрахунок символічних виразів складових гармонік потужності тріфазної системи

В ході проведених досліджень було встановлено, що:

- при полігармонічному характері сигналів тока і напруги з'являється 6-я (і кратні ей, в разі наявності вищих гармонік) гармоніка сигналу сумарної потужності трьохфазної системи (рис. 6, а);
- при наявності фазної несиметрії сигналів тока і напруги в сигналі миттєвої потужності з'являється 2-я гармоніка і кратні ей (рис. 6, б).

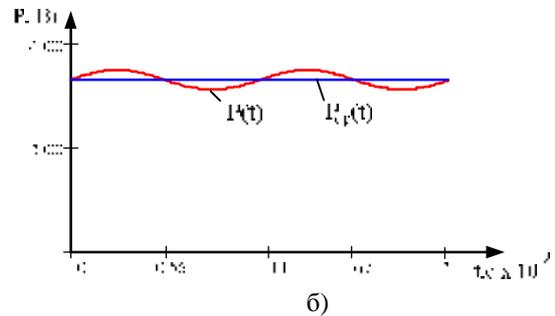
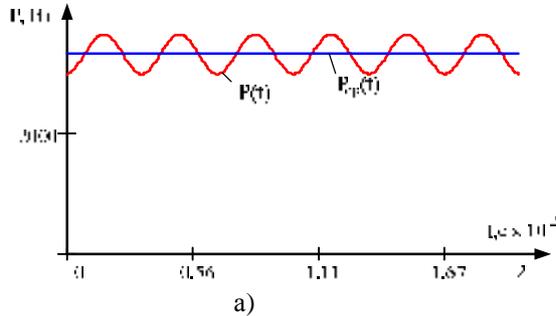


Рисунок 6 – Миттєві і середні значення повної потужності трьохфазної системи при: а) – полігармонічному характері сигналів тока і напруги; б) – наявності фазної несиметрії сигналів тока і напруги

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости введения дополнительно к существующим ПКПЭ показатели, основанные на анализе отдельных гармоник сигналов тока, напряжения и мощности.

В качестве такого показателя предлагается ввести отношение гармоники одной из фаз к среднему значению гармоники такого же порядка по трём фазам:

$$P_{срi_v} = \frac{P_{i_v}}{P_{a_v} + P_{b_v} + P_{c_v}},$$

где  $i = A, B, C$  – фаза,  $v$  – номер гармоники.

Данный показатель соответствует указанным выше требованиям к ПКПЭ. Его информативность исследовалась путём моделирования несимметрий трёхфазной системы: амплитудной несимметрии фазы В; несимметрии активного и индуктивного сопротивления фазы В; одновременной несимметрии напряжения и сопротивлений фазы В.

Амплитуда  $v$ -й гармоники активного  $R$  и индуктивного  $X$  сопротивлений фазы определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$R_{j_v} = R_{j_1} + \frac{v^2 \cdot X_{j_{\mu}} \cdot R_{j_2}}{(X_{j_2} \cdot v + X_{j_{\mu}} \cdot v)^2 + R_{j_2}^2},$$

$$X_{j_v} = X_{j_1} \cdot v + \frac{v^3 (X_{j_2}^2 \cdot X_{j_{\mu}} + X_{j_2} \cdot X_{\mu_2}^2) + X_{j_{\mu}} \cdot v \cdot R_{j_2}}{(X_{j_2} \cdot v + X_{j_{\mu}} \cdot v)^2 + R_{j_2}^2},$$

где  $j = A, B, C$  – фаза двигателя,  $v$  – номер гармоники,  $R_{j_v}, X_{j_v}$  – амплитуда  $v$ -й гармоники активного и индуктивного сопротивлений  $j$ -й фазы двигателя.

- при наличии фазной несимметрии сигналів тока или напруги в сигналі миттєвої потужності з'являється 2-я гармоніка і кратні ей (рис. 6, б).

Полное сопротивление  $v$ -й гармоники фазы определяется в соответствии с выражением:

$$Z_{j_v} = \sqrt{R_{j_v}^2 + X_{j_v}^2}.$$

Амплитуды гармоник напряжения  $U_{j_v}$  изменялись по нелинейной зависимости, а гармоник тока определялись по выражению:

$$I_{j_v} = \frac{U_{j_v}}{Z_{j_v}}.$$

В результате обработки данных по представленному показателю, получены таблицы его значений при разной степени несимметрии фазы В – от полной симметрии (амплитуда фазы В составляет 100% от амплитуд фаз А и С), до крайнего случая несимметрии – отсутствия фазы; а также при наличии несимметрии активных и индуктивных сопротивлений (табл. 1); а также получены таблицы аналогичных коэффициентов для сигналов тока и напряжения фазы (табл. 2).

В таблицах обозначено:  $R_{b_1}, X_{b_1}$  – амплитуды первых гармоник активного и индуктивного сопротивлений;  $U_b$  – амплитуда первой гармоники напряжения;  $P_2, P_4, P_6, I_1, I_3, U_1, U_3$  – номера гармоник мощности, тока и напряжения для которых исследовался коэффициент.

Из результатов обработки данных видно, что суммарное значение коэффициента по всем фазам равно 1, в случае полной амплитудной симметрии коэффициент по каждой фазе равен  $\frac{1}{3}$ , в крайнем случае несимметрии – коэффициент по отсутствующей фазе равен 0, по двум другим – 0,5.

Таблица 1 – Исследование информативности коэффициента  $P_{срi_v}$

Вид несимметрии	P2			P4			P6		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Rb1=0,9*Rb1; Xb1=0,81*Xb1; Ub=0,6*Ub	0,41736	0,16528	0,41736	0,41715	0,16569	0,41715	0,41667	0,1667	0,41667
Rb1=0,9*Rb1; Xb1=0,81*Xb1; Ub=0,8*Ub	0,36982	0,26036	0,36982	0,3695	0,2609	0,3695	0,3689	0,2623	0,3689
Rb1=0,9*Rb1; Xb1=Xb1; Ub=0,8*Ub	0,3776	0,2446	0,3776	0,3779	0,2441	0,3779	0,3786	0,2427	0,3786
<b>Rb1=1*Rb1; Xb1=Xb1; Ub=0,8*Ub</b>	<b>0,37879</b>	<b>0,2424</b>	<b>0,37879</b>	<b>0,37879</b>	<b>0,2424</b>	<b>0,37879</b>	<b>0,37879</b>	<b>0,2424</b>	<b>0,37879</b>
Rb1=0,9*Rb1; Xb1=0,81*Xb1; Ub=Ub	0,32258	0,3548	0,32258	0,3222	0,3555	0,3222	0,3214	0,3571	0,3214
Rb1=1*Rb1; Xb1=0,81*Xb1; Ub=Ub	0,3242	0,35173	0,3242	0,32347	0,3531	0,32347	0,32167	0,3567	0,32167
Rb1=0,9*Rb1; Xb1=Xb1; Ub=Ub	0,33196	0,3361	0,33196	0,3323	0,3354	0,3323	0,3332	0,3337	0,3332
Симметрия	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333

Таблица 2 – Исследование информативности коэффициентов  $I_{срi_v}$ ,  $U_{срi_v}$

Вид несимметрии	I1			U1			I3			U3		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Rb1=0,9*Rb1; Xb1=0,81*Xb1; Ub=0,6*Ub	0,3759	0,2482	0,3759	0,3846	0,2308	0,3846	0,375	0,245	0,375	0,3846	0,2308	0,3846
Rb1=0,9*Rb1; Xb1=0,81*Xb1; Ub=0,8*Ub	0,3472	0,3056	0,3472	0,3571	0,2857	0,3571	0,3462	0,3077	0,3462	0,3571	0,2857	0,3571
Rb1=0,9*Rb1; Xb1=Xb1; Ub=0,8*Ub	0,3559	0,2882	0,3559	0,3571	0,2857	0,3571	0,35698	0,286	0,35698	0,3571	0,2857	0,3571
<b>Rb1=1*Rb1; Xb1=Xb1; Ub=0,8*Ub</b>	<b>0,3571</b>	<b>0,2857</b>	<b>0,3571</b>									
Rb1=0,9*Rb1; Xb1=0,81*Xb1; Ub=Ub	0,3225	0,3549	0,3225	0,333	0,333	0,333	0,3214	0,3571	0,3214	0,333	0,333	0,333
Rb1=1*Rb1; Xb1=0,81*Xb1; Ub=Ub	0,3241	0,3517	0,3241	0,333	0,333	0,333	0,32167	0,3567	0,32167	0,333	0,333	0,333
Rb1=0,9*Rb1; Xb1=Xb1; Ub=Ub	0,332	0,33599	0,332	0,333	0,333	0,333	0,3315	0,333698	0,3315	0,333	0,333	0,333
Симметрия	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333

Исследования показали, что при наличии амплитудной несимметрии и условия постоянства сопротивлений по фазам, данный коэффициент будет одинаков по всем гармоникам одной фазы. Таким образом, по данному критерию можно оценивать степень несимметрии.

**Выводы.** В результате проведённых исследований были сформулированы требования к ПКПЭ, проверено соответствие существующих показателей выдвинутым требованиям. Была показана необходимость введения показателей, основанных на анализе отдельных гармонических составляющих сигналов тока, напряжения и мощности, и предложен такой показатель. Следующим этапом работы является апробация определённых показателей в системах диагностики и определения технического состояния ЭМО.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК Издательство стандартов, – 1998.
- Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях, – Киев: Наук. думка, 1985.–268 с.
- Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173 с.
- Родькин Д.И. Энергопроцессы в трёхфазной двигательной нагрузке с несинусоидальным напряжением питания // Проблемы создания новых ма-

шин и технологий. Сб. научных трудов КГПУ: Вып. 1. – Кременчуг, 1998. С. 23-34

5. Родькин Д.И., Чёрный А.П., Мартыненко В.А. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах // Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПУ: Вып. 1. – Кременчуг, 2002. С. 81-85

6. Чёрный А.П. Определение снижения ресурса асинхронных двигателей по показателям качества преобразования энергии // Збірник праць Кіровоградського НТУ, 2004, вип. 15, - С.160-168.

7. Чёрный А.П., Калинов А.П., Мамчур Д.Г. Применение показателей качества преобразования энергии для оценки состояния и надёжности электромеханических систем // Зб. наук. праць ДДТУ (техн. науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 519-523.

8. Родькин Д.И. Новая система показателей качества использования электрической энергии // Науковий вісник НГУ, 2004, №3, С. 20-26.

9. Сидоренко В.М., Родькин Д.И., Чорний О.П., Мамчур Д.Г. Автоматизація розрахунку складових миттєвої потужності електричних сигналів // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. - Вип. 3 (26). - Кременчук: КДПУ, 2004. - С. 91-96.

10. Ильинский Н.Ф., Горнов А.О. Критерий эффективности процесса электромеханического преобразования энергии // Электричество 1987. №10 . С. 24-29.

Стаття надійшла 14.05.2008 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.І.