

## ВОЗМОЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА ЭНЕРГОДИАГНОСТИКИ В ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ ЗАДАЧАХ

**Введение.** Сложные периодические сигналы напряжения и тока при анализе энергетических процессов аппроксимируются гармоническими рядами Фурье. В случае линейных устройств такой подход позволяет воспользоваться принципом суперпозиции, предполагающим независимость действия каждой из составляющих гармоник напряжения и тока.

С помощью произведения таких сигналов получается соответствующий периодический сигнал мгновенной мощности. Использование составляющих мгновенной мощности для составления уравнения баланса мощностей позволяет определять электромагнитные параметры машин переменного тока [1, 2]. Метод энергодиагностики базируется на использовании полных уравнений мгновенной мощности.

С использованием метода энергодиагностики успешно может быть решен целый ряд задач научного и технического характера, важных в принципиальном отношении. Известно, что анализ электротехнических схем, электромеханических устройств по соответствующим схемам замещения осуществляется с использованием уравнений баланса напряжений, соотношений, вытекающих из закона Кирхгофа. Энергетические соотношения при этом не используются. В лучшем случае по итогам анализа осуществляется проверка на соответствие полученных результатов закону сохранения энергии в форме баланса мощностей.

Несмотря на широкомасштабное использование рассматриваемого метода, он применим в линейных схемах, а с отдельными оговорками – в системах с нелинейностями.

**Постановка задач исследования.** Целью работы является определение механизма формирования составляющих мгновенной мощности и идентификационных уравнений для линейных и нелинейных электротехнических систем.

**Материалы исследования.** Класс задач идентификационного характера в схемах с нелинейностями успешно может решаться с использованием метода энергодиагностики, разработанного в последнее время [3-6]. Сущность метода заключается в том, что полагается питание устройства или системы сложным периодическим сигналом, который с соблюдением необходимых математических ограничений можно представить в форме ряда Фурье.

Условная цепь, на основании которой объясняется принцип энергодиагностики, представлена на рис. 1. Схема содержит источник напряжения  $U(t)$ , элементы цепи, включенные последовательно, параллельно или в смешанном порядке.

Условная цепь, на основании которой объясняется принцип энергодиагностики, представлена на рис. 1. Схема содержит источник напряжения  $U(t)$ , элементы цепи, включенные последовательно, параллельно или в смешанном порядке.

Каждый из элементов, в свою очередь, может состоять из одного или нескольких элементарных линейных или нелинейных звеньев. Деление конкретной схемы на расчетные элементы осуществляется при конкретизации определенной технической задачи. Так, например, схему замещения асинхронного двигателя можно представить в форме соответствующего включения расчетных сопротивлений  $Z_1, Z_2, Z_3$  – статорной цепи, цепи намагничивания, вторичной (роторной) цепи, рис. 2.

Выделение статорной и роторной цепей, а также цепи намагничивания связано с конструкцией, особенностями анализа режимов работы электрической машины. На рис. 2 представлена также структура расчетных элементов  $Z_1, Z_2, Z_3$ . Каждый из

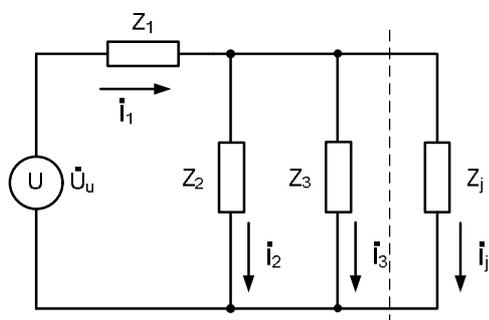


Рис. 1. Схема замещения идентифицируемой системы

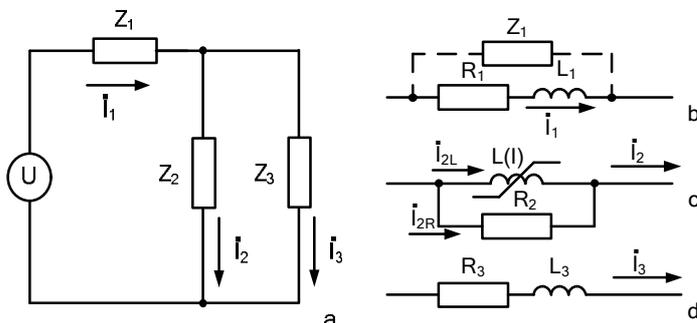


Рис. 2. Схема замещения асинхронного двигателя, а; структура расчетных элементов: статорной цепи, б; цепи намагничивания, с; роторной цепи, d

этих элементов может состоять из физических элементов: индуктивностей, активных сопротивлений, емкостей, каждый из которых (в силу тех или иных физических процессов) может быть постоянным или меняющимся от

времени (или других параметров). В соответствии с законом сохранения можно записать общее выражение для уравнения баланса мощности в исследуемой схеме:

$$P_{\text{и}}(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + \dots + P_j(t), \quad (1)$$

где под символом  $P(t)$  представлены мгновенные мощности соответствующих расчетных элементов.

Зависимости для мгновенной мощности наиболее характерных физических элементов имеют такой вид [5]:

– для источника питания:  $P_{\text{и}}(t) = U(t) \cdot I(t)$ ;

– для активного сопротивления:  $P_{\text{R}}(t) = I^2(t) \cdot R$ ;

– для индуктивности:  $P_{\text{L}}(t) = E(t) \cdot I(t) = L \frac{dI(t)}{dt} \cdot I(t)$ ;

– для емкости:  $P_{\text{C}}(t) = E(t) \cdot I(t) = \frac{I(t)}{C} \cdot \left( \int I(t) dt \right)$ ;

– для индуктивности, зависящей от времени:

$$P_{\text{L}}(t) = E(t) \cdot I(t) = \frac{d(I(t) \cdot L(t))}{dt} \cdot I(t) = \frac{d \left( I(t) \cdot \left( \alpha_1 + 3\alpha_3 \cdot (I_{3a} \cos(3\Omega t) + I_{3b} \sin(3\Omega t))^2 + \dots + \right. \right.}{dt} \left. \left. + p\alpha_p \cdot (I_{ma} \cos(m\Omega t) + I_{mb} \sin(m\Omega t))^{p-1} \right) \right) \cdot I(t);$$

– для насыщаемой индуктивности:

$$P_{\text{L}}(t) = E(t) \cdot I(t) = \frac{d(I(t) \cdot L(I))}{dt} \cdot I(t) = \frac{d \left( I(t) \cdot \left( \alpha_1 + 3\alpha_3 \cdot I^2(t) + \dots + p\alpha_p \cdot I^{p-1}(t) \right) \right)}{dt} \cdot I(t);$$

– для сопротивления, зависящего от времени:

$$P_{\text{R}}(t) = E(t) \cdot I(t) = (I(t) \cdot R(t)) \cdot I(t) = \left( I(t) \cdot \left( R_0 + \sum_{z=1}^Z R_{za} \cos(z\Omega t) + \sum_{z=1}^Z R_{zb} \sin(z\Omega t) \right) \right) \cdot I(t);$$

– для меняющейся во времени емкости:

$$P_{\text{C}}(t) = E(t) \cdot I(t) = \left( \int \frac{I(t)}{C(t)} dt \right) \cdot I(t) = \left( \int I(t) \left( C_0 + \sum_{q=1}^Q C_{qa} \cos(q\Omega t) + \sum_{q=1}^Q C_{qb} \sin(q\Omega t) \right) dt \right) \cdot I(t),$$

где  $\alpha_1, \alpha_3, \dots, \alpha_p$  – постоянные коэффициенты, получаемые при аппроксимации кривой намагничивания полиномом  $\Phi(I) = \alpha_1 \cdot I + \alpha_3 \cdot I^3 + \dots + \alpha_p \cdot I^{2p+1}$ ;  $p$  – номер составляющей аппроксимационного полинома насыщаемой индуктивности;  $R_0$  – постоянная составляющая сопротивления, зависящего от времени;  $R_{za}, R_{zb}$  – соответственно косинусные и синусные составляющие сопротивления;  $z$  – номер составляющей сопротивления;  $Z$  – число составляющих сопротивления;  $C_0$  – постоянная составляющая меняющейся во времени емкости;  $C_{qa}, C_{qb}$  – соответственно косинусные и синусные составляющие меняющейся во времени емкости;  $q$  – номер составляющей емкости;  $Q$  – число составляющих емкости;  $\Omega$  – круговая частота сети.

При этом выражения для напряжения и тока в общей форме записи имеют вид:

$$U(t) = \sum_0^N (U_{na} \cos n\Omega t + U_{nb} \sin n\Omega t), \quad (2)$$

$$\text{или } \dot{U} = \sum_{n=0}^{n=N} (\dot{U}_{na} + \dot{U}_{nb});$$

$$I(t) = \sum_0^M (I_{ma} \cos m\Omega t + I_{mb} \sin m\Omega t), \quad (3)$$

$$\text{или } \dot{I} = \sum_{m=0}^{m=M} (\dot{I}_{ma} + \dot{I}_{mb}).$$

Выражения для мгновенной мощности конкретных физических элементов, как видно из приведенных выше зависимостей, отличаются сложностью и включают производные, интегралы ортогональных составляющих гармонического тока. На первый взгляд определение составляющих мощностей представляет сложную аналитическую задачу. Однако то, что в основе энергопроцессов находятся известные физические законы практические задачи определения мгновенных мощностей легко алгоритмируются и автоматизируются для использования ЭВМ.

Частота гармонических составляющих мгновенной мощности при умножении компонент с относительными частотами  $m$  и  $n$  определяется так:  $k = m \pm n$ .

Отметим, что при  $m = n$  имеем гармоники мощности канонического порядка  $k_c$ , а при  $m \neq n$  – неканонического  $k_s$  порядков:

$$k_c = m \pm n \text{ при } m = n;$$

$$k_s = m \pm n \text{ при } m \neq n.$$

Очевидно также то, что при определенных значениях  $m$  и  $n$  может иметь место равенство  $k_c = k_s$ . Это означает, что суммарное значение гармоник  $k$ -го порядка в общем случае должно определяться в форме сумм  $k$ -х составляющих (канонических и неканонических). Это принципиально важно в том отношении, что позволяет более широко смотреть на уравнение баланса составляющих мгновенной мощности конкретной анализируемой схемы.

Анализ показал, что мгновенная мощность элементов включает совокупность следующих составляющих:

$$P(t) = P_{k_0\Sigma} + P_{k_{ac}\Sigma}(t) + P_{k_{bc}\Sigma}(t) + P_{k_{as}\Sigma}(t) + P_{k_{bs}\Sigma}(t), \quad (4)$$

где  $P_{k_0\Sigma} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left( \sum_{m=n}^{N,M} U(t) \cdot I(t) \right) dt$  – постоянная составляющая мгновенной мощности;

$$P_{k_{ac}\Sigma}(t) = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T \left( \sum_{m=n}^{N,M} U(t) \cdot I(t) \right) \cos k\Omega t dt$$
 – косинусная составляющая мгновенной мощности канонического

порядка;

$$P_{k_{bc}\Sigma}(t) = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T \left( \sum_{m=n}^{N,M} U(t) \cdot I(t) \right) \sin k\Omega t dt$$
 – синусная составляющая мгновенной мощности канонического

порядка;

$$P_{k_{as}\Sigma}(t) = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T \left( \sum_{m \neq n}^{N,M} U(t) \cdot I(t) \right) \cos k\Omega t dt$$
 – косинусная составляющая мгновенной мощности неканонического

порядка;

$$P_{k_{bs}\Sigma}(t) = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T \left( \sum_{m \neq n}^{N,M} U(t) \cdot I(t) \right) \sin k\Omega t dt$$
 – синусная составляющая мгновенной мощности неканонического

порядка.

Следует отметить, что совокупность уравнений, определяющих энергобаланс в анализируемой схеме, – основное положение в теории мгновенной мощности.

База компонент мгновенной мощности – это постоянная составляющая, косинусная и синусная компоненты. Последняя часто отождествляется с так называемой реактивной мощностью. Характерно при этом, что при анализе только канонических составляющих мощности (что в известной степени можно считать допустимым) отпадает необходимость анализа уравнений для косинусных составляющих мгновенной мощности, так как эти уравнения повторяют уравнения для постоянных составляющих (амплитуда косинусных составляющих  $k$ -го порядка равна постоянной составляющей или активной мощности). Очевидно при этом с одной стороны исключение из анализа целой гаммы зависимостей – уравнений косинусных компонент, а также составляющих, получаемых путем умножения разночастотных гармоник напряжения и тока, для которых  $m \pm n = k$ .

В этой связи оправданно введение понятия полных уравнений мгновенных мощностей, включающих нулевую, косинусную и синусную составляющие, получаемых путем перемножения всех составляющих напряжения и тока. Это дает неоспоримые преимущества при анализе. Это можно видеть из табл. 1 [4].

Из приведенной табл. 1 видно: при умножении напряжения  $U(t)$  и тока  $I(t)$ , имеющих каждый из сигналов только по четыре компоненты гармоник ( $v_{mi} \{1; 5; 7; 11\}$ ;  $v_{nu} \{1; 5; 7; 11\}$ ), общее число компонент мощностей существенно больше – 11 шт. Это четные гармоники от нуля до 22. Сам этот факт имеет достаточно весомое значение. Так, если для практических целей составить уравнения для идентификации параметров некоторой схемы, воспользовавшись заданным числом гармоник тока, то количество уравнений в нашем случае будет равно 4; если же составить уравнения по параметрам энергетического режима (гармоникам мощности), то число уравнений для идентификации будет 11, т. е. почти в три раза больше. Это, несомненно, является положительным аспектом при выборе рациональных подходов к операции идентификации.

Таблица 1 - Таблица гармоник мощности.

N/n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$v_{m_i}$	-	1	-	-	-	5	-	7	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$v_{m_u}$	-	1	-	-	-	5	-	7	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$v_{P_k}$	0	-	2	-	4	-	6	-	8	-	10	-	12	-	14	-	16	-	18	-	-	-	22
$v_{P_{kc}}$	0	-	2	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	-	22
$v_{P_{ks}}$	-	-	2	-	4	-	6	-	8	-	10	-	12	-	14	-	16	-	18	-	-	-	-

Полученные в [1] результаты показывают, что число гармоник мгновенной мощности существенно выше числа гармонических в исходных сигналах напряжения и тока. Это важный вывод, говорящий в пользу того, что подобным путем (определяя гармонический состав мгновенной мощности) можно получить значительное число идентификационных уравнений, если за основу взять уравнения баланса составляющих мгновенной мощности. Это означает прежде всего то, что число гармоник напряжения при анализе не должно быть значительным.

С другой стороны, при определении параметров можно усложнять схему замещения путем введения дополнительных элементов – аналогов физических процессов, которые, как правило, не учитываются. Число идентификационных уравнений при таком принципе их формирования будет достаточным для решения новой сложной задачи.

Понятие уравнений баланса при анализе более широкое, чем, например, уравнения баланса активной мощности или реактивной компоненты. Так, каждая из гармоник мгновенной мощности имеет три уравнения баланса. Каждое из них может быть основой для идентификационного уравнения; совокупность их, как известно, дает систему, из которой можно определить нужные параметры схемы замещения.

Следует подчеркнуть, что кажущаяся множественность уравнений баланса вроде бы носит некоторый произвол при анализе. В действительности, их число определяет по существу точность математического описания энергетического процесса: большое число уравнений означает то, что учтены все составляющие напряжения и тока.

Итак, если общее число гармоник мгновенной мощности равно  $k$ , то принципиально может быть составлена система уравнений баланса такого вида (табл. 1, рис. 2):

$$P_{0u} = P_{0R_1} + P_{0R_2} + P_{0R_3}; \quad (5)$$

$$P_{2as u} = P_{2as R_1} + P_{2as R_2} + P_{2as R_3} + P_{2as L_1} + P_{2as L(1)} + P_{2as L_3}; \quad (6)$$

$$P_{2bs u} = P_{2bs R_1} + P_{2bs R_2} + P_{2bs R_3} + P_{2bs L_1} + P_{2bs L(1)} + P_{2bs L_3}; \quad (7)$$

$$P_{4as u} = P_{4as R_1} + P_{4as R_2} + P_{4as R_3} + P_{4as L_1} + P_{4as L(1)} + P_{4as L_3}; \quad (8)$$

$$P_{4bs u} = P_{4bs R_1} + P_{4bs R_2} + P_{4bs R_3} + P_{4bs L_1} + P_{4bs L(1)} + P_{4bs L_3}; \quad (9)$$

$$P_{6as u} = P_{6as R_1} + P_{6as R_2} + P_{6as R_3} + P_{6as L_1} + P_{6as L(1)} + P_{6as L_3}; \quad (10)$$

$$P_{6bs u} = P_{6bs R_1} + P_{6bs R_2} + P_{6bs R_3} + P_{6bs L_1} + P_{6bs L(1)} + P_{6bs L_3}; \quad (11)$$

$$P_{8as u} = P_{8as R_1} + P_{8as R_2} + P_{8as R_3} + P_{8as L_1} + P_{8as L(1)} + P_{8as L_3}; \quad (12)$$

$$P_{8bs u} = P_{8bs R_1} + P_{8bs R_2} + P_{8bs R_3} + P_{8bs L_1} + P_{8bs L(1)} + P_{8bs L_3}; \quad (13)$$

$$P_{10ac u} + P_{10as u} = P_{10ac R_1} + P_{10ac R_2} + P_{10ac R_3} + P_{10ac L_1} + P_{10ac L(1)} + \quad (14)$$

$$+ P_{10ac L_3} + P_{10as R_1} + P_{10as R_2} + P_{10as R_3} + P_{10as L_1} + P_{10as L(1)} + P_{10as L_3};$$

$$P_{10bc u} + P_{10bs u} = P_{10bc R_1} + P_{10bc R_2} + P_{10bc R_3} + P_{10bc L_1} + P_{10bc L(1)} + \quad (15)$$

$$+ P_{10bc L_3} + P_{10bs R_1} + P_{10bs R_2} + P_{10bs R_3} + P_{10bs L_1} + P_{10bs L(1)} + P_{10bs L_3};$$

$$P_{12as u} = P_{12as R_1} + P_{12as R_2} + P_{12as R_3} + P_{12as L_1} + P_{12as L(1)} + P_{12as L_3}; \quad (16)$$

$$P_{12bs u} = P_{12bs R_1} + P_{12bs R_2} + P_{12bs R_3} + P_{12bs L_1} + P_{12bs L(1)} + P_{12bs L_3}; \quad (17)$$

$$P_{14ac u} + P_{14as u} = P_{14ac R_1} + P_{14ac R_2} + P_{14ac R_3} + P_{14ac L_1} + P_{14ac L(1)} + \quad (18)$$

$$+ P_{14ac L_3} + P_{14as R_1} + P_{14as R_2} + P_{14as R_3} + P_{14as L_1} + P_{14as L(1)} + P_{14as L_3};$$

$$P_{14bc u} + P_{14bs u} = P_{14bc R_1} + P_{14bc R_2} + P_{14bc R_3} + P_{14bc L_1} + P_{14bc L(1)} + \quad (19)$$

$$+ P_{14bc L_3} + P_{14bs R_1} + P_{14bs R_2} + P_{14bs R_3} + P_{14bs L_1} + P_{14bs L(1)} + P_{14bs L_3};$$

$$P_{16_{as}u} = P_{16_{as}R_1} + P_{16_{as}R_2} + P_{16_{as}R_3} + P_{16_{as}L_1} + P_{16_{as}L(1)} + P_{16_{as}L_3}; \quad (20)$$

$$P_{16_{bs}u} = P_{16_{bs}R_1} + P_{16_{bs}R_2} + P_{16_{bs}R_3} + P_{16_{bs}L_1} + P_{16_{bs}L(1)} + P_{16_{bs}L_3}; \quad (21)$$

$$P_{18_{as}u} = P_{18_{as}R_1} + P_{18_{as}R_2} + P_{18_{as}R_3} + P_{18_{as}L_1} + P_{18_{as}L(1)} + P_{18_{as}L_3}; \quad (22)$$

$$P_{18_{bs}u} = P_{18_{bs}R_1} + P_{18_{bs}R_2} + P_{18_{bs}R_3} + P_{18_{bs}L_1} + P_{18_{bs}L(1)} + P_{18_{bs}L_3}; \quad (23)$$

$$P_{22_{ac}u} + P_{22_{as}u} = P_{22_{ac}R_1} + P_{22_{ac}R_2} + P_{22_{ac}R_3} + P_{22_{ac}L_1} + P_{22_{ac}L(1)} + P_{22_{ac}L_3} + P_{22_{as}R_1} + P_{22_{as}R_2} + P_{22_{as}R_3} + P_{22_{as}L_1} + P_{22_{as}L(1)} + P_{22_{as}L_3}; \quad (24)$$

$$P_{22_{bc}u} + P_{22_{bs}u} = P_{22_{bc}R_1} + P_{22_{bc}R_2} + P_{22_{bc}R_3} + P_{22_{bc}L_1} + P_{22_{bc}L(1)} + P_{22_{bc}L_3} + P_{22_{bs}R_1} + P_{22_{bs}R_2} + P_{22_{bs}R_3} + P_{22_{bs}L_1} + P_{22_{bs}L(1)} + P_{22_{bs}L_3}; \quad (25)$$

где  $P_{k_{ac}u}$ ,  $P_{k_{bc}u}$  – косинусные и синусные канонические составляющие мгновенной мощности источника полигармонического напряжения на соответствующей гармонике;  $P_{k_{as}u}$ ,  $P_{k_{bs}u}$  – косинусные и синусные неканонические составляющие мгновенной мощности источника полигармонического напряжения на соответствующей гармонике;  $P_{k_{ac}R}$ ,  $P_{k_{bc}R}$  – косинусные и синусные канонические составляющие мгновенной мощности активного сопротивления соответствующей цепи на соответствующей гармонике;  $P_{k_{as}R}$ ,  $P_{k_{bs}R}$  – косинусные и синусные неканонические составляющие мгновенной мощности активного сопротивления соответствующей цепи конкретной гармоники;  $P_{k_{ac}L}$ ,  $P_{k_{bc}L}$  – косинусные и синусные канонические составляющие мгновенной мощности индуктивности соответствующей цепи;  $P_{k_{as}L}$ ,  $P_{k_{bs}L}$  – косинусные и синусные неканонические составляющие мгновенной мощности индуктивности соответствующей цепи.

Оценка эффективности метода энергодиагностики с использованием полных уравнений мгновенной мощности выполнена путем анализа влияния используемых гармоник напряжения и тока, а также составляющих

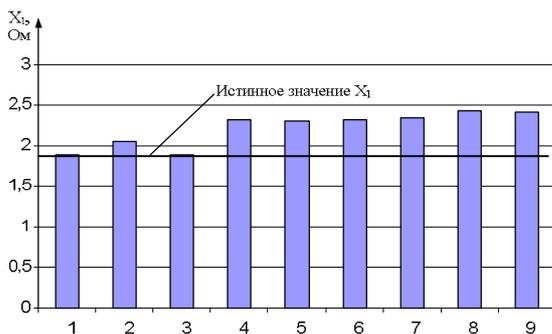


Рис. 3. Значения индуктивного сопротивления первичной цепи при использовании различных гармонических составляющих:

- 1 –  $v\{1;3;5\}$ ;    2 –  $v\{1;3;7\}$ ;    3 –  $v\{1;3;9\}$ ;  
 4 –  $v\{1;5;7\}$ ;    5 –  $v\{1;5;9\}$ ;    6 –  $v\{1;7;9\}$ ;  
 7 –  $v\{3;5;7\}$ ;    8 –  $v\{3;5;9\}$ ;    9 –  $v\{3;7;9\}$ .

мгновенной мощности на определяемые электромагнитные параметры АД (для исследований использовался асинхронный двигатель типа 4A100L6, запитанный от тиристорного регулятора напряжения).

На рис. 3 приведены результаты определения электромагнитных параметров АД при использовании различных гармонических составляющих напряжения и тока. В качестве примера рассмотрено определение индуктивного сопротивления рассеяния статора. Как видно из анализа, точность определяемых электромагнитных параметров тем выше, чем меньше используются высокочастотные составляющие напряжения и тока.

Нужные значения гармоник напряжения и тока при идентификации параметров могут быть получены при использовании тиристорного регулятора напряжения. Задавая угол управления тиристорного регулятора напряжения, можно получить нужный спектр составляющих напряжения и тока.

С целью проверки эффективности использования значащих составляющих напряжения, тока, а следовательно и компонент мощности, была проверена зависимость приведенных величин при изменении угла управления при использовании регулятора напряжения, рис. 4-5. Анализ кривых на рис. 4 показывает, что значительное изменение составляющих мгновенной мощности наблюдается при использовании ТРН при углах управления в диапазоне от  $75^\circ$  до  $150^\circ$  [5].

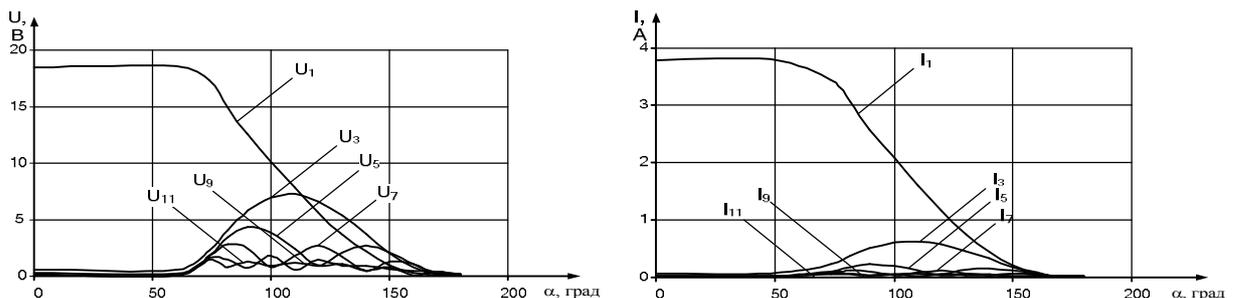


Рис. 4. Гармонические составляющие напряжения и тока

Анализ показывает, что наиболее целесообразно определять электромагнитные параметры электрической машины при существенных значениях составляющих мгновенной мощности (при существенных значениях канонических и неканонических составляющих), т.е. при углах управления  $\left(\frac{\pi}{2} \div \frac{2\pi}{3}\right)$ , рис. 5.

В ходе исследований для оценки эффективности метода энергодиагностики определены электромагнитные параметры АД при различных значениях составляющих мгновенной мощности (рис. 6). Для анализа выполнено

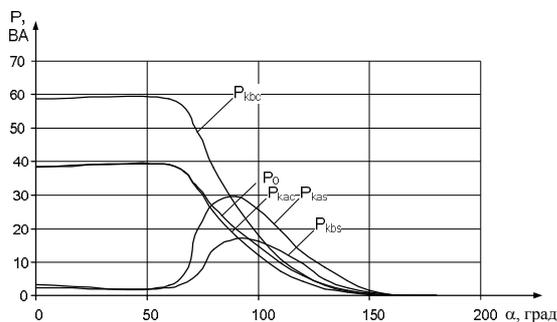


Рис. 5. Составляющие мгновенной мощности

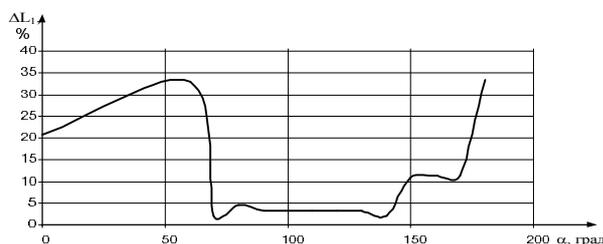


Рис. 6. Ошибка определения индуктивности статора методом энергодиагностики

определение следующих электромагнитных параметров: активного сопротивления вторичной цепи, индуктивности первичной (статорной) и вторичной (роторной) цепей, а также контура намагничивания. На рис. 6 приведена ошибка определения индуктивности статора. Аналогичный характер изменения наблюдается и для остальных электромагнитных параметров. Из анализа кривой, приведенной на рис. 6, видно, что наиболее целесообразно определять электромагнитные параметры АД при существенных значениях составляющих мгновенной мощности.

С учетом изложенного ясно, что использование приведенных уравнений баланса мощностей позволяет определить электромагнитные параметры асинхронных двигателей.

**Выводы.** Метод энергодиагностики с использованием полных уравнений мгновенной мощности применим для анализа как линейных, так и нелинейных систем.

Уравнение баланса мощностей  $k$ -го порядка составляется в виде равенства мощности источника полигармонического напряжения

сумме мощностей всех элементов электрической системы.

Выражение для мгновенной мощности любого элемента схемы замещения определяется произведением сигналов напряжения и тока и включает сложные зависимости для нелинейных элементов. Мгновенная мощность включает в себя сумму двух составляющих: канонической и неканонической, которые расширяют возможности метода энергодиагностики.

Уравнения баланса мощностей позволяют получить значительное число идентификационных уравнений для определения электромагнитных параметров двигателей, а также дополнительных элементов – аналогов физических процессов.

Составление идентификационных уравнений с использованием составляющих мощности канонического и неканонического порядка, эффективность метода при оценивании электромагнитных параметров существенно зависят от уровней гармоник в кривых компонент, определяющих мгновенную мощность.

Предложенный метод оценивания параметров асинхронных машин эффективен в тех случаях, когда гармоники компонент наиболее существенны.

#### Литература.

1. Родькин Д.И. Принцип суперпозиции в процессах преобразования энергии // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, вип. 1/2003. - Кременчук. - С. 80-85.
2. Родькин Д.И., Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническим напряжением и током // Електротехніка - №6, 2004. - С. 37-41.
3. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Електроприво́ди переменного тока: Труды международной 14 научнотехнической конференции. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2007- С. 273-278.
4. Родькин Д.И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського, вип. 3/2007 (44).- Кременчук.- С. 66-71.
5. Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И., Калинов А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського, вип. 3/2007 (44).- Кременчук. - С. 130-136.
6. Калинов А.П., Лейко В.В., Родькин Д.И. Спектральный анализ мгновенной мощности в сети с полигармоническим напряжением и током // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, вип. 3/2006 (38), частина 2. – Кременчук.- С. 59-72.