

## ВОЗМОЖНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Родькин Д.И., д.т.н., проф., Ромашихин Ю.В., ассист.*

*Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина*

*E-mail: [romashihin\\_yuriy@mail.ru](mailto:romashihin_yuriy@mail.ru)*

В статье рассмотрен энергетический метод идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей, базирующийся на системе уравнений баланса составляющих мгновенной мощности. Показана недопустимость использования одной схемы замещения при идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей с учетом дефектов и неисправностей. Рассмотрена эффективность метода энергодиагностики при идентификации электромагнитных параметров трехфазных асинхронных двигателей.

**Ключевые слова:** метод энергодиагностики, мгновенная мощность, электромагнитные параметры.

**Введение.** Наиболее распространенным видом эксплуатирующихся электрических машин являются асинхронные двигатели (АД), которые по различным причинам выходят из строя и поступают на электроремонтные предприятия и в цеха для проведения ремонтных операций [2]. Ежегодный выход АД в капитальный ремонт по различным отраслям составляет в среднем 20-30%, хотя по некоторым отраслям может достигать до 50%. Асинхронные двигатели, поступившие в ремонт, содержат дефекты и неисправности, такие, как витковые и межвитковые замыкания, распушивание листов стали, повреждение поверхности электротехнической стали, нарушение балансировки ротора, наличие эксцентриситета и т.д., которые приводят к отклонению параметров и характеристик электрической машины (ЭМ) от тех, что заложены заводом-изготовителем [2]. Все это обуславливает необходимость учета дефектов и неисправностей в математическом аппарате для определения параметров и характеристик АД. Существенное внимание следует уделять определению электромагнитных параметров (ЭМП), на основании которых рассчитывают пусковые и рабочие характеристики, потери в ЭМ и т.п.

Анализ [4-8] показал, что в настоящее время существенное распространение получили частотные методы идентификации ЭМП АД, большинство из которых базируется на анализе переходных процессов. Как отдельный класс можно рассматривать методы, базирующиеся на использовании полигармонического питания обмоток статора АД, среди которых можно выделить метод энергодиагностики [7, 8]. В основе метода лежит использование составляющих гармоник мгновенной мощности в уравнениях баланса при полигармоническом питании, которое обеспечивается применением тиристорных регуляторов напряжения или преобразователей частоты со сложными законами управления. Тиристорные регуляторы напряжения позволяют обеспечить требуемый гармонический состав напряжения и тока при изменении угла управления ключами в диапазоне

$\alpha = \frac{5p}{12} \div \frac{5p}{6}$ , имеют меньшие массогабаритные и

стоимостные показатели по сравнению с преобразователями частоты, обеспечивают надежность и простоту реализации. Ввиду явных преимуществ для получения полигармонического питания при реализации метода энергодиагностики выбран тиристорный регулятор напряжения.

Уравнения баланса мощностей формируются по каждой из гармоник мощности, которые получаются путем перемножения гармоник напряжения и тока. Использование полигармонического питания позволяет намного расширить возможности аппарата идентификации. При использовании регулятора напряжения сигналы напряжения и тока имеют вид (рис. 1):

$$U(t) = \sum_{n=0}^N U_n \cos(n\Omega t - y_n);$$

$$I(t) = \sum_{m=0}^M I_m \cos(m\Omega t - y_m)$$

или

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^N U_{na} \cos(n\Omega t) + \sum_{n=1}^N U_{nb} \sin(n\Omega t);$$

$$I(t) = I_0 + \sum_{m=1}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) + \sum_{m=1}^M I_{mb} \sin(m\Omega t),$$

где  $U_{na} = U_n \cos(y_n)$ ;  $U_{nb} = U_n \sin(y_n)$ ;

$I_{ma} = I_m \cos(y_m)$ ;  $I_{mb} = I_m \sin(y_m)$ ;

$I_0$  – постоянная составляющая тока;  $I_{ma}$ ,  $I_{mb}$  – амплитудные значения косинусных и синусных составляющих тока высших гармоник;  $m$  – номер гармоники тока;  $M$  – число гармоник тока;  $\Omega$  – круговая частота сети;  $y_m$  – угол сдвига фаз между током и осью, принимаемой за нулевое положение векторов;  $U_0$  – постоянная составляющая напряжения;  $U_{na}$ ,  $U_{nb}$  – амплитудные значения косинусных и синусных составляющих напряжения высших гармоник;  $n$  – номер гармоники напряжения;  $N$  – число гармоник напряжения;  $y_n$  – угол сдвига фаз между напряжением и осью, принимаемой за нулевое положение векторов.

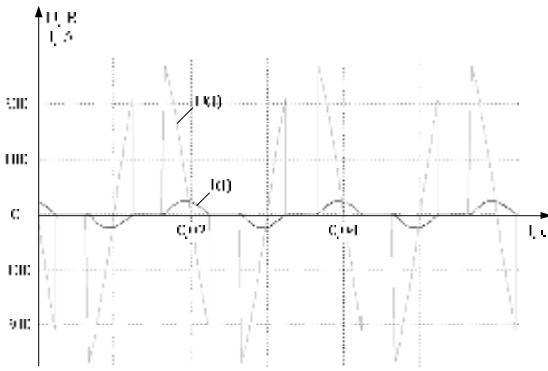


Рисунок 1 – Кривые напряжения и тока при использовании регулятора напряжения

Базовым уравнением баланса является равенство мгновенной мощности источника питания  $P_u(t)$  и сумм мгновенных мощностей элементарных потребителей, входящих в комплекс [1, 9]:

$$P_u(t) = \sum_{i=1}^H P_i(t),$$

где  $i$  – индекс соответствующего элементарного потребителя;  $H$  – количество элементарных потребителей.

Баланс мощности вытекает как следствие из теоремы Теллеждена: сумма произведений напряжений  $U_i$  и токов  $I_i$  всех ветвей цепи, удовлетворяющих законам Кирхгофа, равна нулю [4]. Произведение  $U_i I_i$  представляет собой мгновенную мощность  $P_i$   $i$ -й ветви, поэтому сумма мощностей всех ветвей цепи равняется нулю. Если выделить ветви с независимыми источниками, то баланс мощности можно сформулировать следующим образом: сумма мощностей, отдаваемых независимыми источниками, равняется сумме мощностей, потребляемых остальными ветвями электрической цепи.

Применительно к Т-образной схеме замещения АД, в качестве элементарных потребителей выступает каждый из параметров схемы замещения (рис. 2). Уравнения баланса мгновенной мощности одной фазы двигателя составляются в виде равенств составляющих мгновенной мощности источника питания и составляющих мгновенной мощности всех элементов электромеханической системы [1, 3, 5]:

$$P_u(t) = P_{R_1}(t) + P_{R_2}(t) + P_{R_m}(t) + P_{L_1}(t) + P_{L_2}(t) + P_{L_m}(t),$$

где  $P_{R_1}(t)$ ,  $P_{R_2}(t)$ ,  $P_{R_m}(t)$ ,  $P_{L_1}(t)$ ,  $P_{L_2}(t)$ ,  $P_{L_m}(t)$  – значения мгновенных мощностей элементов схемы замещения, определяемых в соответствии с [13]:

– источника полигармонического напряжения:

$$P_u(t) = U(t) \cdot I(t);$$

– для активного сопротивления:

$$P_R(t) = E_R(t) \cdot I(t) = I^2(t) \cdot R;$$

– для индуктивности:

$$P_L(t) = E_L(t) \cdot I(t) = L \cdot \frac{dI(t)}{dt} \cdot I(t).$$

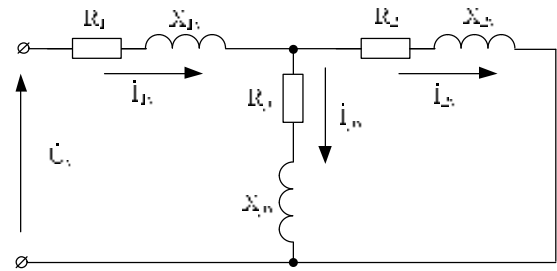


Рисунок 2 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $R_1$  – активное сопротивление статорной цепи;  $L_1$  – индуктивность статорной цепи;  $R_m$  – активное сопротивление контура намагничивания;  $L_m$  – индуктивность контура намагничивания;  $R_2$  – активное сопротивление роторной цепи;  $L_2$  – индуктивность роторной цепи;  $U_n$  – напряжение, подводимое к АД;  $I_{1n}$  – ток статорной цепи;  $I_{2n}$  – ток контура намагничивания;  $I_{2m}$  – ток роторной цепи;  $p$  – относительная частота

Как указывалось в [7-9], метод энергодиагностики базируется на использовании системы уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности источника полигармонического напряжения и на элементах, которые составляются на основании выбранной схемы замещения (СЗ). Схема замещения может содержать дополнительные нелинейности и контуры для учета различного рода дефектов и неисправностей [10].

Как показано в [13], элементы в СЗ могут быть как линейные, так и нелинейные. Использование только линейных элементов в СЗ позволяет, с одной стороны, упростить процедуру анализа энергопроцессов и идентификации ЭМП АД, а с другой – может привести к появлению значительных погрешностей, которые возникают в результате линеаризации нелинейностей электрической машины. Так, например, потери в стали учитываются в СЗ введением нелинейностей в контур намагничивания. Гистерезисные потери описываются нелинейной зависимостью индуктивности контура намагничивания от тока намагничивания [13]:

$$L_m(I_m) = a_1 + 3a_3 \cdot I_m^2(t) + \dots + (2p+1)a_{2p+1} \cdot I_m^{2p}(t),$$

где  $I_m$  – ток, протекающий через нелинейную индуктивность;  $a_1, a_3, \dots, a_p$  – постоянные коэффициенты, определяемые при аппроксимации кривой намагничивания.

Учет потерь достигается введением в контур намагничивания активного сопротивления, которое нелинейно зависит от частоты тока [3]:

$$R_m(n) = R_m \cdot n^a,$$

где  $a$  – постоянный коэффициент, зависящий от состояния пакета стали.

Линеаризация кривой намагничивания приводит к необходимости рассмотрения только линейного участка характеристики и не учитывает появление дополнительных гармоник при протекании тока через нелинейную индуктивность [14]. Исключение из анализа нелинейностей приводит к появлению дополнительных погрешностей идентификации ЭМП и необходимости оценки энергопроцессов АД при наличии дефектов и неисправностей. Введение нелинейностей в СЗ АД позволяет учесть такие явления, как вихревые токи, эффект вытеснения тока в роторе, кривую намагничивания и т.п., а также дает возможность объяснить природу насыщения пакета стали.

**Цель работы.** Оценка эффективности метода энергодиагностики при идентификации электромагнитных параметров трехфазного АД.

**Материал и результаты исследований.** Как было отмечено выше, система идентификационных уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности, составляется на основании рассматриваемой СЗ. В случае известных допущений, а также при пренебрежении дефектами и неисправностями, выбирается Т-образная СЗ, которая содержит статорную цепь, роторную цепь и контур намагничивания (рис. 1). Такое упрощение приводит в возникновению погрешностей, которые появляются в результате того, что СЗ не отвечает реальному состоянию электрической машины.

Рассмотрим пример идентификации ЭМП АД с учетом потерь от вихревых токов для случаев использования классической Т-образной СЗ (рис. 2) и Т-образной СЗ с контуром, параллельным намагничивающему (рис. 3) [10]. На рис. 3 приняты следующие обозначения:  $R_a$  – активное сопротивление, учитывающее потери от вихревых токов;  $I_{an}$  – ток контура вихревых токов.

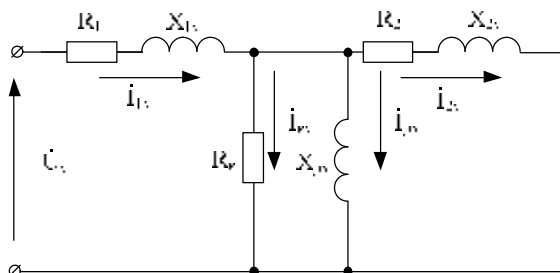


Рисунок 3 – Т-образная СЗ АД с учетом потерь от вихревых токов

Для исследования получена математическая модель АД, которая составлена с учетом контура вихревых токов (рис. 3), и измерены сигналы

напряжения и тока при питании двигателя от тиристорного регулятора напряжения, который позволяет обеспечить требуемый гармонический состав измеряемых сигналов [11]. Исследования проведены для АД серии 4АП (табл. 1).

При этом составлены уравнения баланса составляющих гармоник мгновенной мощности для СЗ, изображенных на рис. 2 и рис. 3. Применительно к Т-образной СЗ уравнения баланса мощностей при использовании трех гармоник напряжения и тока ( $m = n = 1, 3, 5$ ) примут вид:

$$P_{0u\Sigma} = P_{0R_1} + P_{0R_m} + P_{0R_2};$$

$$P_{2au\Sigma} = P_{2aR_1} + P_{2aR_m} + P_{2aR_2} + P_{2aL_1} + P_{2aL_m} + P_{2aL_2};$$

$$P_{2bu\Sigma} = P_{2bR_1} + P_{2bR_m} + P_{2bR_2} + P_{2bL_1} + P_{2bL_m} + P_{2bL_2};$$

$$P_{4au\Sigma} = P_{4aR_1} + P_{4aR_m} + P_{4aR_2} + P_{4aL_1} + P_{4aL_m} + P_{4aL_2};$$

$$P_{4bu\Sigma} = P_{4bR_1} + P_{4bR_m} + P_{4bR_2} + P_{4bL_1} + P_{4bL_m} + P_{4bL_2};$$

$$P_{6au\Sigma} = P_{6aR_1} + P_{6aR_m} + P_{6aR_2} + P_{6aL_1} + P_{6aL_m} + P_{6aL_2};$$

$$P_{6bu\Sigma} = P_{6bR_1} + P_{6bR_m} + P_{6bR_2} + P_{6bL_1} + P_{6bL_m} + P_{6bL_2};$$

$$P_{8au\Sigma} = P_{8aR_1} + P_{8aR_m} + P_{8aR_2} + P_{8aL_1} + P_{8aL_m} + P_{8aL_2};$$

$$P_{8bu\Sigma} = P_{8bR_1} + P_{8bR_m} + P_{8bR_2} + P_{8bL_1} + P_{8bL_m} + P_{8bL_2};$$

$$P_{10au\Sigma} = P_{10aR_1} + P_{10aR_m} + P_{10aR_2} + P_{10aL_1} + P_{10aL_m} + P_{10aL_2};$$

$$P_{10bu\Sigma} = P_{10bR_1} + P_{10bR_m} + P_{10bR_2} + P_{10bL_1} + P_{10bL_m} + P_{10bL_2}.$$

Результаты идентификации ЭМП АД с помощью метода энергодиагностики для схем, изображенных на рис. 2 и 3, сведены в табл. 2. Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что при использовании классической Т-образной СЗ наблюдаются значительные погрешности при идентификации ЭМП АД, которые превышают 30 %.

Таким образом, анализ показал, что использование одной СЗ при идентификации ЭМП АД, содержащих дефекты, недопустимо ввиду значительных погрешностей. Поэтому необходимо рассматривать различные СЗ в зависимости от дефектов и неисправностей в АД. При этом в зависимости от существующих в АД дефектов схемы замещения можно разделить на четыре

группы. К первой группе относится классическая Т-образная СЗ, изображенная на рис. 2. Ко второй группе – схемы, учитывающие конструктивные особенности АД специального назначения (глубокопазные ЭМ и др.) и такие явления, как эффект вытеснения тока в обмотках ротора. Третья группа насчитывает схемы замещения для описания процессов в симметричных АД с несимметрией магнитной системы, учитывающие увеличение потерь от гистерезиса и вихревых токов статора и ротора. К четвертой группе относят трехфазные СЗ, которые позволяют анализировать энергопроцессы в трехфазном несимметричном АД с учетом механической части.

**Таблица 1 – Паспортные данные исследуемого асинхронного двигателя**

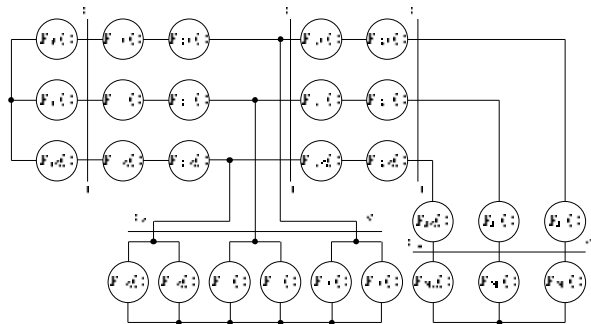
Параметр	Значение
Серия двигателя	4АП1004
Номинальная мощность, Вт	4000
Номинальное напряжение, В	380
Номинальный ток, А	8,7
Номинальный КПД	0,8
Номинальный коэффициент мощности	0,84
Номинальная скорость вращения, об/мин	1420
Активное сопротивление статора, Ом	1,35
Активное сопротивление ротора, Ом	1,39
Индуктивность статора, Гн	0,00676
Индуктивность контура намагничивания, Гн	0,246
Индуктивность ротора, Гн	0,00673

**Таблица 2 – Ошибки идентификации ЭМП АД**

№ п/п	Наименование параметра	Ошибки идентификации параметров при использовании Т-образной СЗ, изображенной	
		на рис. 1	на рис. 2
1	$\Delta R_2, \%$	4,734	0.131
2	$\Delta R_m, \%$	27,159	–
3	$\Delta R_a, \%$	–	13.788
4	$\Delta L_1, \%$	6,842	4.906
5	$\Delta L_m, \%$	34,761	11.908
6	$\Delta L_2, \%$	7,194	4.809

Особый интерес вызывает исследование энергопроцессов в трехфазном АД, который вызван появлением электромагнитной и механической несимметрии при появлении дефектов и

неисправностей. При этом трехфазную СЗ можно представить в виде диаграммы формирования мощностей, которая изображена на рис. 4 [10, 12]. На рис. 4 можно выделить следующие участки:  $S_I$  – мгновенная мощность источника полигармонического напряжения, которая поступает на электрический двигатель;  $S_{II}$  – мгновенная мощность на активном сопротивлении и индуктивности статорной цепи;  $S_{III}$  – мгновенная мощность на активном сопротивлении и индуктивности роторной цепи;  $S_{IV}$  – мгновенная мощность механической части асинхронного двигателя;  $S_V$  – мгновенная мощность потерь энергии от вихревых токов и гистерезиса.



**Рисунок 4 – Диаграмма формирования мощностей трехфазного АД**

Система идентификационных уравнений, согласно рис. 3, будет включать выражения для составляющих мгновенной мощности источника полигармонического напряжения, в качестве которого выступает тиристорный регулятор напряжения, на линейных и нелинейных элементах СЗ (активных сопротивлений и индуктивностей), на элементах, учитывающих потери от гистерезиса и вихревых токов, механической части АД. Тогда баланс составляющих гармоник мгновенной мощности для СЗ, изображенной на рис. 4, примет вид:

$$P_{uA}(t) + P_{uB}(t) + P_{uC}(t) = P_{элA}(t) + P_{элB}(t) + P_{элC}(t) + P_{эм}(t) + P_{cm}(t),$$

где  $P_{uA}(t) + P_{uB}(t) + P_{uC}(t)$  – мощность источника питания фаз А, В, С; электрическая мощность фаз А, В, С:

$$P_{элA}(t) = P_{R_1A}(t) + P_{L_1A}(t) + P_{R_mA}(t) + P_{L_mA}(t) + P_{R_2A}(t) + P_{L_2A}(t);$$

$$P_{элB}(t) = P_{R_1B}(t) + P_{L_1B}(t) + P_{R_mB}(t) + P_{L_mB}(t) + P_{R_2B}(t) + P_{L_2B}(t);$$

$$P_{элC}(t) = P_{R_1C}(t) + P_{L_1C}(t) + P_{R_mC}(t) + P_{L_mC}(t) + P_{R_2C}(t) + P_{L_2C}(t),$$

где  $P_{R_1A}(t), P_{R_1B}(t), P_{R_1C}(t)$  – активные сопротивления статорной цепи фаз А, В, С;  $P_{R_mA}(t), P_{R_mB}(t), P_{R_mC}(t)$  – активные сопротивления контура намагничивания фаз А, В, С;

$P_{R_2A}(t), P_{R_2B}(t), P_{R_2C}(t)$  – активные сопротивления роторной цепи фаз А, В, С;  $P_{L_1A}(t), P_{L_1B}(t), P_{L_1C}(t)$  – индуктивности статорной цепи фаз А, В, С;  $P_{L_mA}(t), P_{L_mB}(t), P_{L_mC}(t)$  – индуктивности контура намагничивания фаз А, В, С;  $P_{L_2A}(t), P_{L_2B}(t), P_{L_2C}(t)$  – индуктивности роторной цепи фаз А, В, С;  $P_{эм}(t)$  – электромагнитная мощность:

$$P_{эм}(t) = P_J(t) + P_M(t),$$

динамическая мощность и мощность на валу:

$$P_J(t) = J \cdot \frac{dw(t)}{dt} \cdot w(t); P_M(t) = M(t) \cdot w(t),$$

$J$  – момент инерции двигателя;  $M(t)$  – момент двигателя;  $w(t)$  – угловая скорость двигателя;  $P_{см}(t) = P_{сmA}(t) + P_{сmB}(t) + P_{сmC}(t)$  – мощность потерь в стали.

Система уравнений баланса составляющих мгновенной мощности примет вид:

$$\begin{aligned} P_{uA_0} + P_{uB_0} + P_{uC_0} &= P_{элA_0} + P_{элB_0} + P_{элC_0} + P_{эм_0}; \\ P_{uA_2a} + P_{uB_2a} + P_{uC_2a} &= P_{элA_2a} + P_{элB_2a} + P_{элC_2a} + P_{эм_2a}; \\ P_{uA_2b} + P_{uB_2b} + P_{uC_2b} &= P_{элA_2b} + P_{элB_2b} + P_{элC_2b} + P_{эм_2b}; \\ P_{uA_4a} + P_{uB_4a} + P_{uC_4a} &= P_{элA_4a} + P_{элB_4a} + P_{элC_4a} + P_{эм_4a}; \\ P_{uA_4b} + P_{uB_4b} + P_{uC_4b} &= P_{элA_4b} + P_{элB_4b} + P_{элC_4b} + P_{эм_4b}; \\ \dots \\ P_{uA_{ka}} + P_{uB_{ka}} + P_{uC_{ka}} &= P_{элA_{ka}} + P_{элB_{ka}} + P_{элC_{ka}} + P_{эм_{ka}}; \\ P_{uA_{kb}} + P_{uB_{kb}} + P_{uC_{kb}} &= P_{элA_{kb}} + P_{элB_{kb}} + P_{элC_{kb}} + P_{эм_{kb}}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} P_{uA_0} + P_{uB_0} + P_{uC_0} &= P_{R_1A_0} + P_{R_mA_0} + P_{R_2A_0} + P_{R_1B_0} + \\ &+ P_{R_mB_0} + P_{R_2B_0} + P_{R_1C_0} + P_{R_mC_0} + P_{R_2C_0} + P_{эм_0}; \\ P_{uA_2a} + P_{uB_2a} + P_{uC_2a} &= P_{R_1A_2a} + P_{R_mA_2a} + P_{R_2A_2a} + \\ &+ P_{L_1A_2a} + P_{L_mA_2a} + P_{L_2A_2a} + P_{R_1B_2a} + P_{R_mB_2a} + P_{R_2B_2a} + \\ &+ P_{L_1B_2a} + P_{L_mB_2a} + P_{L_2B_2a} + P_{R_1C_2a} + P_{R_mC_2a} + P_{R_2C_2a} + \\ &+ P_{L_1C_2a} + P_{R_mL_2a} + P_{R_2L_2a} + P_{эм_2a}; \\ P_{uA_2b} + P_{uB_2b} + P_{uC_2b} &= P_{R_1A_2b} + P_{R_mA_2b} + P_{R_2A_2b} + \\ &+ P_{L_1A_2b} + P_{L_mA_2b} + P_{L_2A_2b} + P_{R_1B_2b} + P_{R_mB_2b} + P_{R_2B_2b} + \\ &+ P_{L_1B_2b} + P_{L_mB_2b} + P_{L_2B_2b} + P_{R_1C_2b} + P_{R_mC_2b} + P_{R_2C_2b} + \\ &+ P_{L_1C_2b} + P_{R_mL_2b} + P_{R_2L_2b} + P_{эм_2b}; \\ \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{uA_{ka}} + P_{uB_{ka}} + P_{uC_{ka}} &= P_{R_1A_{ka}} + P_{R_mA_{ka}} + P_{R_2A_{ka}} + \\ &+ P_{L_1A_{ka}} + P_{L_mA_{ka}} + P_{L_2A_{ka}} + P_{R_1B_{ka}} + P_{R_mB_{ka}} + P_{R_2B_{ka}} + \\ &+ P_{L_1B_{ka}} + P_{L_mB_{ka}} + P_{L_2B_{ka}} + P_{R_1C_{ka}} + P_{R_mC_{ka}} + P_{R_2C_{ka}} + \\ &+ P_{L_1C_{ka}} + P_{R_mL_{ka}} + P_{R_2L_{ka}} + P_{эм_{ka}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{uA_{kb}} + P_{uB_{kb}} + P_{uC_{kb}} &= P_{R_1A_{kb}} + P_{R_mA_{kb}} + P_{R_2A_{kb}} + \\ &+ P_{L_1A_{kb}} + P_{L_mA_{kb}} + P_{L_2A_{kb}} + P_{R_1B_{kb}} + P_{R_mB_{kb}} + P_{R_2B_{kb}} + \\ &+ P_{L_1B_{kb}} + P_{L_mB_{kb}} + P_{L_2B_{kb}} + P_{R_1C_{kb}} + P_{R_mC_{kb}} + P_{R_2C_{kb}} + \\ &+ P_{L_1C_{kb}} + P_{R_mL_{kb}} + P_{R_2L_{kb}} + P_{эм_{kb}}. \end{aligned}$$

Разделение постоянной составляющей позволяет получить систему идентификационных уравнений в виде:

$$\begin{aligned} P_{uA_0(1)} + P_{uB_0(1)} + P_{uC_0(1)} &= P_{R_1A_0(1)} + P_{R_mA_0(1)} + P_{R_2A_0(1)} + \\ &+ P_{R_1B_0(1)} + P_{R_mB_0(1)} + P_{R_2B_0(1)} + P_{R_1C_0(1)} + P_{R_mC_0(1)} + \\ &+ P_{R_2C_0(1)} + P_{эм(1)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{uA_0(3)} + P_{uB_0(3)} + P_{uC_0(3)} &= P_{R_1A_0(3)} + P_{R_mA_0(3)} + P_{R_2A_0(3)} + \\ &+ P_{R_1B_0(3)} + P_{R_mB_0(3)} + P_{R_2B_0(3)} + P_{R_1C_0(3)} + P_{R_mC_0(3)} + \\ &+ P_{R_2C_0(3)} + P_{эм(3)}; \end{aligned}$$

...

$$\begin{aligned} P_{uA_0(N)} + P_{uB_0(N)} + P_{uC_0(N)} &= P_{R_1A_0(N)} + P_{R_mA_0(N)} + \\ &+ P_{R_2A_0(N)} + P_{R_1B_0(N)} + P_{R_mB_0(N)} + P_{R_2B_0(N)} + P_{R_1C_0(N)} + \\ &+ P_{R_mC_0(N)} + P_{R_2C_0(N)} + P_{эм(N)}, \end{aligned}$$

где индекс в скобках указывает на то, от произведения каких гармоник напряжения и тока образуется рассматриваемая постоянная составляющая мгновенной мощности.

Использование трехфазной схемы замещения позволяет идентифицировать ЭМП АД с учетом дефектов и неисправностей при вращающемся роторе. Это дает возможность определить знакопеременные составляющие мощности, угловой скорости и момента электродвигателя. К тому же идентификация ЭМП при вращающемся роторе позволяет определить индуктивности при скольжениях, отличных от единицы.

Неизвестными параметрами при рассмотрении трехфазной схемы замещения являются электромагнитные параметры схемы замещения (активные сопротивления и индуктивности по фазам), составляющие гармоник токов в цепях схемы, составляющие гармоник угловой скорости. При этом момент инерции, гармоники момента двигателя, активные сопротивления статора по фазам определяются заранее известными методами. Поэтому неизвестных электромагнитных параметров схемы замещения фазы А – 5, всего по АД – 15. Неизвестных составляющих гармоник токов фазы А – 4N, где N – количество составляющих гармоник тока. Если в систему

идентификационных уравнений ввести дополнительно уравнения, составленные с использованием законов Кирхгофа для токов, тогда количество неизвестных составляющих гармоник токов составляет  $2N$ , а с учетом всех фаз –  $2N \cdot 3 = 6N$ . Если учитывать составляющие угловой скорости, то дополнительно появляются еще  $2N+1$  неизвестных параметров при представлении скорости в виде:

$$w(t) = w_0 + \sum_{v=1}^V w_{va} \cos(v\Omega t) + \sum_{v=1}^V w_{vb} \sin(v\Omega t),$$

где  $v$  – номер гармоники угловой скорости;  $V$  – количество гармоник угловой скорости;  $w_0$  – постоянная составляющая угловой скорости;  $w_{va}$ ,  $w_{vb}$  – косинусные и синусные составляющие угловой скорости.

Таким образом, общее количество неизвестных параметров составляет  $4N+16$ . При шести анализируемых гармониках напряжения и тока (1, 3,

**Таблица 3 – Результаты идентификации ЭМП АД**

№ п/п	Идентифицируемые ЭМП	Значения ЭМП			Ошибки определения ЭМП		
		фаза А	фаза В	фаза С	фаза А	фаза В	фаза С
1	$R_m$	9,465 Ом	9,414 Ом	9,521 Ом	-12,14 %	-12,14 %	-12,14 %
2	$R_2$	1,357 Ом	1,344 Ом	1,354 Ом	2,49 %	2,49 %	2,49 %
3	$L_1$	0,006465 Гн	0,006475 Гн	0,00649 Гн	4,37 %	4,37 %	4,37 %
4	$L_2$	0,006509 Гн	0,006509 Гн	0,0065 Гн	3,76 %	3,76 %	3,76 %
5	$L_m$	0,288 Гн	0,287 Гн	0,286 Гн	-16,97 %	-16,97 %	-16,97 %

**Таблица 4 – Составляющие гармоник угловой скорости**

Номер гармоники	Составляющие угловой скорости	
	Косинусные	Синусные
0	158,488	–
1	2,887	-0,219
3	1,044	0,205
5	-0,566	-0,108
7	0,319	0,036
9	-0,184	-0,037
11	0,113	0,028

Из табл. 3 видно, что метод энергодиагностики применим для идентификации электромагнитных параметров трехфазного АД, причем наибольшая погрешность наблюдается при определении параметров контура намагничивания.

**Выводы.** 1. В виду значительных погрешностей недопустимо использование Т-образной схемы при идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей с дефектами и неисправностями.

2. Анализ показал, что при идентификации электромагнитных параметров АД, которые прошли ремонт или находились длительное время в эксплуатации, необходимо использовать схемы замещения с введенными дополнительными контурами и нелинейностями для учета дефектов и неисправностей электрических машин.

3. Энергетический метод базируется на уравнениях баланса составляющих гармоник

5, 7, 9, 11) имеем 40 неизвестных. При использовании метода энергодиагностики получается  $4N-1$  идентификационных уравнений. С учетом разделения постоянной, канонических и неканонических составляющих количество идентификационных уравнений составляет  $7N-2=40$ .

Рассмотрим эффективность метода энергодиагностики при идентификации ЭМП АД серии 4АП1004 номинальной мощностью 4 кВт (табл. 1). Напряжение и ток статора получим из математической модели АД, составленной в трехфазной системе координат. Результаты идентификации электромагнитных параметров при использовании метода энергодиагностики приведены в табл. 3, составляющих гармоник угловой скорости – в табл. 4.

мгновенной мощности источника полигармонического напряжения и электрических и механических элементов схемы замещения. Метод позволяет идентифицировать электромагнитные параметры схем замещения с учетом дополнительных контуров и нелинейностей.

4. Энергетический метод позволяет идентифицировать электромагнитные параметры вращающегося трехфазного АД с учетом механической части с ошибкой, не превышающей 17%.

5. Учет электромагнитной или механической несимметрии возможен только при использовании трехфазной схемы замещения АД с учетом механической части.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашихин Ю. В. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей / Ромашихин Ю. В., Родькин Д. И., Калинов А. П. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. Зб. наук. праць КДПУ. – Вип. 3(44). – Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 130-136.
2. Котеленец Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н. Ф. Котеленец., Н. Л. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1988. – 231 с.
3. Родькин Д. И. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока / Родькин Д. И., Калинов А. П., Ромашихин Ю. В. // Электроприводы переменного тока: Труды международной 14 научно-технической

конференции. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – С. 273-278.

4. Баланс энергий в силовых цепях / [Тонкаль В. Е., Новосельцев А. В., Денисюк С. П. и др.]. – Киев: Наукова думка, 1992. – 312 с.

5. Родькин Д. Й. Развитие частотных методов оценки параметров двигателей переменного тока / Родькин Д. Й., Калинов А. П., Ромашихин Ю. В. // Вісник КДПУ. Зб. наук. праць КДПУ. – Вип. 3 (33).- Кременчук: КДПУ, 2005. – С. 43-47.

6. Ромашихин Ю. В. Классификация и эффективность методов определения электромагнитных параметров машин переменного тока / Ромашихин Ю. В. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Вип. 3-4 (4). – Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2008. – С. 26-30.

7. Родькин Д. Й. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей / Родькин Д. Й., Калинов А. П., Ромашихин Ю. В. // Вісник КДПУ. Зб. наук. праць КДПУ ім. М.Остроградського. - Вип. 3 (44). – Кременчук: КДПУ ім. М.Остроградського, 2007. – С. 130-136.

8. Родькин Д. Й. Энергодиагностика асинхронных машин / Д. Й Родькин., Ю. В Ромашихин // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 3/2010 (62). – Част. 2. – С. 128-137.

9. Родькин Д. И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов / Родькин Д. И. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського, вип. 3/2007 (44). – Кременчук. – С. 66 - 71.

10. Родькин Д. Й. Схемы замещения асинхронных двигателей в задачах идентификации их электромагнитных параметров / Д. Й Родькин., Ю. В. Ромашихин. // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 392-396.

11. Родькин Д. Й. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах / Д. Й Родькин, Ю. В. Ромашихин // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 507-512.

12. Родькин Д. Й. Миттєва потужність трифазного двигунного навантаження з полігармонічними напругою та струмом / Родькин Д. Й. // Журнал „Електроінформ”, №4, 2007. – С. 10-13.

13. Родькин Д. И. Мгновенная мощность нелинейных элементов электрической цепи / Д. И. Родькин, Ю. В Ромашихин // XIV міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. Сборник научных трудов Днепродзержинского

государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 501-506.

14. Родькин Д. И. О разделении на составляющие потерь в стали электрических машин / Родькин Д. И., Огарь В. А., Ромашихин Ю. В. // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 495-500.

## МОЖЛИВОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ В ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

*Родькін Д.Й., д.т.н., проф., Ромашихін Ю.В., асист.*

*Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського*

*вул. Першотравнева, 20, 39600 м. Кременчук, Україна*

*E-mail: [romashihin\\_yuriy@mail.ru](mailto:romashihin_yuriy@mail.ru)*

В статті розглянуто енергетичний метод ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів, який базується на системі рівнянь балансу складових миттєвої потужності. Показана неприпустимість використання однієї схеми заміщення при ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів з урахуванням дефектів і несправностей. Розглянута ефективність методу енергодіагностики при ідентифікації електромагнітних параметрів трифазних асинхронних двигунів.

**Ключові слова:** метод енергодіагностики, миттєва потужність, електромагнітні параметри.

## POSSIBILITIES OF THE ENERGY METHOD IN PROBLEM OF THE IDENTIFICATIONS PARAMETER INDUCTION MOTORS

*Rodkin D.I., Doct. Sc.(Tech.), Prof. Romashihin Y.V., assist.*

*Kremenchug Mykhaylo Ostrogradskiy State University*

*Pervomayskaya st., 20, 39600, Kremenchug, Poltava region., Ukraine*

*E-mail: [romashihin\\_yuriy@mail.ru](mailto:romashihin_yuriy@mail.ru)*

The paper deals with the energy method of identification the electromagnetic parameters of induction motors, which is based on a system of balance equations for components of instant power. Shows the inadmissibility of the use of one scheme at identifications electromagnetic parameter of induction motors with provision for defect and faults. The effectiveness of the energodiagnostic method for identification electromagnetic parameters of three-phase induction motors.

**Key words:** energodiagnostic method, instant power, electromagnetic parameters.