

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПСЕВДОПОЛИГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ

Родькин Д.И., д.т.н., проф.

Кременчугский государственный политехнический университет

имени Михаила Остроградского

39600, г. Кременчуг, Полтавская обл., ул. Первомайская, 20

E-mail: saue@polytech.poltava.ua

Дослідження присвячене аналізу нового методу ідентифікації параметрів електричних машин на базі частотних принципів з використанням так званого псевдополігармонійного впливу, на відміну від відомих підходів, для яких необхідна фізична реалізація різночастотного або полігармонійного живлення агрегату, який ідентифікується. В запропонованому методі в основі використовується розкладання в ряд Фур'є синусоїдальних напруг і струмів статичного режиму на інтервалі, який відрізняється від періоду напруги мережі. Адекватність енергопроцесів під час синусоїдального живлення і при штучному (псевдополігармонічному) полігармонічному сигналі дозволяє розробленим автором енергетичним методом визначити псевдопараметри схеми заміщення. Наближення періоду розкладання до періоду напруги мережі дозволяє інтерполяційними методами визначити реальні параметри схеми заміщення з допустимою похибкою. Метод виключає використання дорогих перетворюючих пристроїв – джерел полігармонійної напруги. Метод по своїй суті базується на комп'ютерних технологіях сучасного рівня і знайде використання у дослідницькій практиці. Метод припускає подальший розвиток і використання у різних галузях науки і техніки. Бібл. 26 найменувань.

Ключові слова: псевдополігармонійний сигнал, енергопроцеси, ідентифікація параметрів.

The research covers the analysis of a new technique of the electrical machines parameters identification based on the frequency principles with pseudoharmonic influence as opposed to well-known approaches, which are require physical implementation of the polyharmonic supply of the equipment, which are identified. In the introduced technique used the Fourier series expansion of the static mode sinusoidal voltages and currents on the range, which are differed from the mains voltage cycle. The energy process adequacy with sinusoidal supply and artificial polyharmonic signal allowed determining the equivalent circuit parameters with the energy technique introduced by the author. The approaching expansion cycle to the mains voltage cycle allows determining the equivalent circuit parameters with an admissible error by the interpolation methods. The technique excludes using expensive converter installation, which are the polyharmonic voltage source. The technique is based on the modern computer technology and will be use in the research practice. The technique assumes the development and using in the field of science and technology. Bibl. 26 names.

Key words: pseudopolyharmonic signal, the energy process, parameters identification.

Введение. Многообразие схемных решений, методов идентификации параметров асинхронных двигателей в большей степени характеризует частные решения проблемы, недостаточное качество получаемых результатов, сложность аппаратуры и невозможность использования предложенных методов в разнообразных условиях ремонтной практики, мониторинга оборудования при его эксплуатации [1, 2, 3, 4, 5].

При анализе методов оценки параметров асинхронных машин по схемам замещения отмечается 18-20 вариантов, отличающихся методологическими подходами, математическим аппаратом, техническими решениями и т.п. [1, 5, 6].

Упомянутый анализ указывает на то, что в последнее время растет интерес к частотным методам идентификации, с одной стороны, а с другой – параметры исследуемых объектов определяются в предположении неизменности схемы замещения. При этом, изменения в характеристиках двигателей, что наблюдается в форме неизбежного явления в

процессе эксплуатации, как полагают некоторые авторы, не приводит к изменению структуры схемы замещения, а лишь к отклонению параметров в ту или иную сторону на соответствующую величину [4, 5, 7, 6].

Опыт, однако, показывает, что определенные повреждения асинхронных машин (например, при закорачивании листов электротехнической стали статора и ротора) приводят к появлению дополнительных контуров, которые в традиционных схемах замещения вообще не присутствуют.

Большинство методов при этом не учитывают значительное число нелинейностей, присущих физическим объектам вообще или появляющихся при повреждениях [7, 8, 9, 10].

Другими словами, существующие методы идентификации асинхронных двигателей имеют целый ряд недостатков, однозначно указывающих на необходимость поиска новых методов идентификации, базирующихся на новых высокотехнологичных решениях.

Целью работы является развитие частотных методов идентификации асинхронных двигателей, в

вующие методы обработки энергетических сигналов при всей их простоте и достаточности

частности, путем использования энергетических критериев, разработанных применительно к системам с полигармоническими источниками питания [3, 11, 12].

Материал и результаты исследований. Сущность энергетических критериев, в варианте частотных методов идентификации, заключается в том, что любое из идентификационных уравнений, которое входит в систему для определения параметров базируется на уравнениях баланса составляющих мгновенной мощности. Баланс уравнений является причиной и следствием использования аппарата мгновенной мощности [12, 13, 14, 15]. Исследования в данном направлении начались в ряде стран в середине 90-х годов прошлого столетия. В Украине исследования в основном сосредотачивались на решении идентификационных задач в силу открывшихся возможностей, а также из-за необходимости решения задач по определению параметров электрических машин после их ремонта или в ходе длительной эксплуатации [5, 16, 18].

Большой объем выполняемых работ при испытании машин требовал использования такого метода, который исключал бы какие бы то ни было операции по агрегированию испытываемых машин с нагрузочными устройствами. Это обстоятельство является чуть ли не решающим при выборе того или иного метода.

Аппарат мгновенной мощности, несмотря на его перспективу, до сих пор не вошел в качестве учебного материала в стандартные учебники и учебные пособия по теоретическим основам электротехники. Это обстоятельство, по мнению автора, требует детализации некоторых моментов аппарата мгновенной мощности в материалах данной работы [8, 9, 13, 14, 16].

Мощность электрической сети в самой общей ее конфигурации определяется равенством:

$$P(t) = U(t)I(t),$$

где $U(t)$ и $I(t)$ – зависимости напряжения и тока на входе рассматриваемой сети.

Следует отметить, что сигналы $U(t)$ и $I(t)$ могут быть гармоническими или негармоническими, периодическими и непериодическими. В общем случае – это могут быть сигналы постоянного тока, случайные сигналы.

Мгновенная мощность – зависимость во времени произведения двух, упомянутых выше, сигналов напряжения и тока. Общепринято считать, анализировать не мгновенные значения мощности, а результаты определенным образом обработанных значений компонент указанного выше произведения [9, 12, 13]. Эта обработка позволяет выделить активную и реактивную мощность искажения, несимметрии и т.п. И этими показателями, естественно, пользуются при решении практических задач, а также в научных исследованиях.

Следует обратить внимание на то, что сущест-

При этом, период T в практических применениях рядов Фурье, как правило, берется равным времени повторяемости тех или иных

базируются на математическом аппарате, включающем операции интегрирования. В силу известных положений, при производстве подобных операций теряется значительная информация [9, 12, 13]. Это обстоятельство по существу является основной причиной сложностей и ошибок при решении задач идентификационного характера.

Произведение $U(t)I(t) = P(t)$ несет информацию энергетического характера об исследуемом процессе, в то время как компоненты $U(t)$ и $I(t)$ – известные электрические параметры. Они, безусловно, определяют энергопроцесс, но они, тем не менее, являются первичными, в то время, как конечный продукт этого процесса – мощность $P(t)$ и энергия $W(t)$. Это обстоятельство требует детального анализа энергетического процесса – совокупности явлений выделения тепла (рассеивания энергии), накопления энергии и т.п.

Математическое описание энергопроцессов с использованием аппарата мгновенной мощности можно получить, воспользовавшись аппроксимационными зависимостями для тока и напряжения. Наиболее приемлемым методом аппроксимации является метод Фурье. Аппроксимация гармоническим рядом дает наиболее точные результаты:

$$U(t) = \sum_{n=1}^{n=N} U_{na} \cos(nWt) + \sum_{n=1}^{n=N} U_{nb} \sin(nWt), \quad (1)$$

$$I(t) = \sum_{m=1}^{m=M} I_{ma} \cos(mWt) + \sum_{m=1}^{m=M} I_{mb} \sin(mWt), \quad (2)$$

где W – базовая угловая частота; n, m – порядковый номер гармонических в кривых напряжения и тока; $U_{na}; U_{nb}; I_{ma}; I_{mb}$ – амплитуды квадратурных составляющих соответствующих гармонических.

Формально параметры M и N могут быть равны бесконечности, но в практических целях они имеют конкретные величины в силу того, что при $m > M$ и $n > N$ значения гармонических пренебрежимо малы.

Отметим, что амплитуды составляющих, входящих в зависимости для $U(t)$ и $I(t)$, определяются следующим образом [19].

$$\begin{aligned} U_{na} &= \frac{2}{T} \int_0^{2p} U(t) \cos(nWt) dt; \\ U_{nb} &= \frac{2}{T} \int_0^{2p} U(t) \sin(nWt) dt; \\ I_{ma} &= \frac{2}{T} \int_0^{2p} I(t) \cos(mWt) dt; \\ I_{mb} &= \frac{2}{T} \int_0^{2p} I(t) \sin(mWt) dt. \end{aligned} \quad (3)$$

$$W'_k = W \cdot k_e'; \quad W_k = W \cdot k_e'',$$

процессов. С одной стороны, это правильный подход к анализу процессов, а с другой – неоднозначное игнорирование некоторых замечательных свойств рядов [19]:

– возможности разложения функции на любом промежутке;

– применимости рядов и аппарата в целом к монотонно изменяющимся или неизменным во времени функциональным зависимостям (в том числе не имеющим периода вообще).

Своего рода «произвол» по выражению автора [19] означает, прежде всего, универсальность математического подхода, с одной стороны, а с другой, следует четко различать сущность физических явлений и их математическую интерпретацию. При периодических процессах получаемый гармонический ряд справедлив на всей временной оси; в случае же разложения функции на произвольно взятом промежутке, процесс аппроксимации адекватно описывает зависимость только на упомянутом интервале.

Указанная свобода выбора интервала, на котором осуществляется аппроксимационный процесс, никоим образом не означает снижение точностных или иных характеристик исследуемого явления. Как и при аппроксимации периодических процессов, в рассматриваемом случае гармоническая аппроксимация дает наиболее точные результаты по сравнению с другими хорошо известными аппроксимационными подходами [19].

С другой стороны, нельзя не отметить того обстоятельства, что при произвольном выборе интервала могут происходить достаточно интересные трансформации получаемых результатов в сферы, где не могут работать (или неудовлетворительно работают) новые математические модели или физические их аналоги. Анализ приведенных зависимостей показывает, что каждую из гармонических функций $\sin(Wt)$ или $\cos(Wt)$ можно разложить по синусам или косинусам на интервале, отличном от периода функции $T = \frac{2p}{W}$.

Получаемые при этом гармонические имеют частоты не кратные частоте W , а отличные от нее, в зависимости от того, насколько период, на котором осуществляется разложение, отличается от периода T . Это проиллюстрировано рисунком 1, где указан период T сетевой гармонике, а также интервалы $T' < T$ и $T'' > T$, на которых можно осуществить разложение традиционной синусоиды в ряд Фурье. При этом, $T' = T_x' = T - x' \cdot T$, а $T'' = T_x'' = T + x'' \cdot T$, а первые гармоники новых разложений будут $W' = \frac{2p}{T} \cdot \frac{1}{1-x'} = W \cdot e'$; $W'' = \frac{2p}{T} \cdot \frac{1}{1+x''} = W \cdot e''$.

Высшие гармонические можно представить в такой форме:

$$\text{где } e' = \frac{1}{1-x'}; e'' = \frac{1}{1-x''}; k_e = k \cdot e.$$

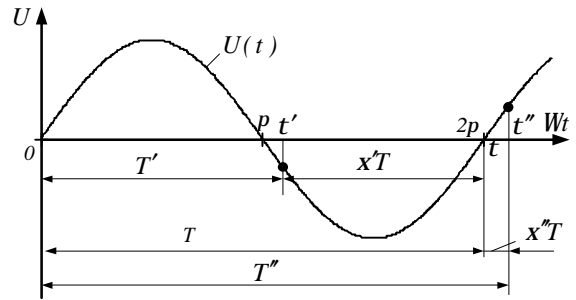


Рисунок 1 – Диаграмма напряжения с разными периодами разложения в ряд Фурье

Для упрощения дальнейших выкладок коэффициенты $k_{e'}$ и $k_{e''}$ в дальнейшем обозначим через k_e . В выражениях для коэффициентов, определяющих амплитуды гармонических составляющих, следует воспользоваться известными зависимостями для коэффициентов ряда Фурье [19]:

$$a_k = \frac{2}{p} \int_0^T f(t) \cos(kwt) dt, \quad (4)$$

$$b_k = \frac{2}{p} \int_0^T f(t) \sin(kwt) dt. \quad (5)$$

В нашем случае $f(t)$ - гармоническая функция $\sin(\Omega t)$ или $\cos(\Omega t)$, $k = k_e$; $w = W$, $T = T_e$.

Коэффициенты разложения в гармонический ряд, если $f(t) = U \cdot \sin(Wt)$ определяются так:

$$a_{ks} = \frac{2U}{T_x} \int_0^{T_x} \sin(Wt) \cdot \cos(k_e \cdot Wt) dt, \quad (6)$$

$$b_{ks} = \frac{2U}{T_x} \int_0^{T_x} \sin(Wt) \cdot \sin(k_e \cdot Wt) dt. \quad (7)$$

В случае, если разложение в гармонический ряд функция $f(t) = U \cdot \cos(Wt)$, то коэффициенты:

$$a_{kc} = \frac{2U}{T_x} \int_0^{T_x} \cos(Wt) \cdot \cos(k_e \cdot Wt) dt, \quad (8)$$

$$b_{kc} = \frac{2U}{T_x} \int_0^{T_x} \cos(Wt) \cdot \sin(k_e \cdot Wt) dt. \quad (9)$$

После известных преобразований получим выражения для коэффициентов:

$$a_{ns} = \frac{U}{T_x} \cdot \left(\frac{\cos((1-k_e)\Omega t)}{1-k_e} - \frac{\cos((1+k_e)\Omega t)}{1+k_e} \right) \Bigg|_0^{T_x}; \quad (10)$$

Определение коэффициентов разложения можно осуществить в соответствие с приведенными выше зависимостями.

Аналогичным образом может быть получено

$$b_{ks} = \frac{U}{T_x} \cdot \left(\frac{\sin((1-k_e)\Omega t)}{1-k_e} - \frac{\sin((1+k_e)\Omega t)}{1+k_e} \right) \Big|_0^{T_x}; \quad (11)$$

$$a_{kc} = \frac{U}{T_x} \cdot \left(\frac{\sin((1-k_e)\Omega t)}{1-k_e} + \frac{\sin((1+k_e)\Omega t)}{1+k_e} \right) \Big|_0^{T_x}; \quad (12)$$

$$b_{kc} = \frac{U}{T_x} \cdot \left(\frac{\cos((1-k_e)\Omega t)}{1-k_e} + \frac{\cos((1+k_e)\Omega t)}{1+k_e} \right) \Big|_0^{T_x}. \quad (13)$$

Вышеприведенные уравнения позволяют получить коэффициенты разложения в ряд Фурье синусоидального сигнала по синусам или косинусам:

$$U(t) = U \sin(Wt)_{[0, T']} = \sum_{k=1}^{k=\infty} b_{n1} \sin(k_e \cdot Wt) dt. \quad (14)$$

В зависимости (14) знак $[0, T']$ означает, что разложение осуществляется на интервале от 0 до T' . Разложение по косинусам или синусам принципиально важно при решении практических задач. Предположим, что функция задана в промежутке $[0, T']$. При разложении ее в ряд Фурье дополним функцию $f(t) = U \sin(Wt)$ в промежутке $[0, -T']$ по произволу. Возможные дополнения представлены на рис. 2 а, в. При этом на рис. 2,а значение функции $f(t) = f(-t)$ и в результате получается четная функция в промежутке $[-T', T']$. Ее разложение имеет только косинусные составляющие.

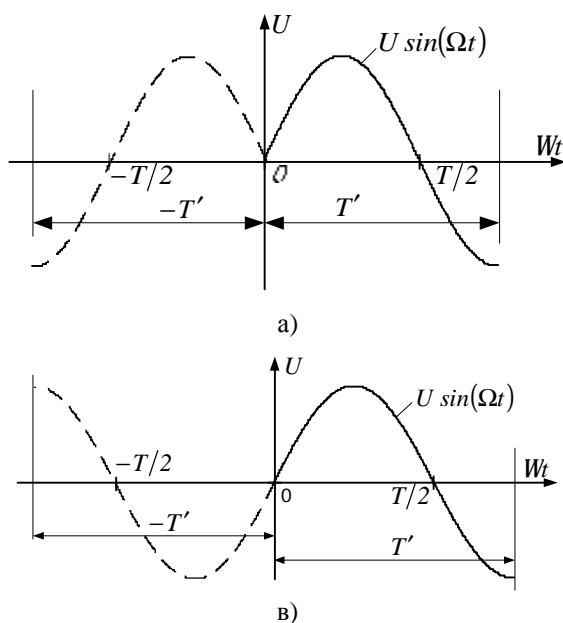


Рисунок 2 — Возможные варианты дополнений для получения разложения по косинусам и синусам

мгновенной мощности источника питания и

разложение в ряд Фурье и зависимости для тока:

$$I(t) = I \sin(\Omega t)_{[0, T]} = \sum_{k=1}^{k=\infty} a_n \cos(k_e \cdot \Omega t) + \sum_{k=1}^{k=\infty} b_n \sin(k_e \cdot \Omega t). \quad (15)$$

На рис. 3 представлены кривые напряжения, тока и мощности $P(t)$, полученной общепринятым путем $P(t) = U(t)I(t)$.

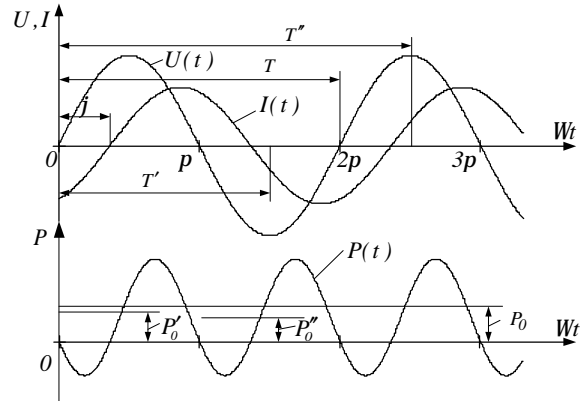


Рисунок 3 – Диаграммы напряжения, тока и мощности гармонических сигналов

Для искомого разложения на интервале $[0, T']$ можно воспользоваться двумя путями: получить аналитическое выражение для $P(t)$ и получить с помощью математического аппарата для коэффициентов разложения в ряд Фурье разложение $P(t)_{[0, T']}$ на интересующем интервале $[0, T']$ или другим путем – получить разложения на заданном интервале для напряжения $U(t)_{[0, T']}$ и тока $I(t)_{[0, T']}$, а затем, путем перемножения полученных рядов, находится разложение для $P(t)$ в форме:

$$P(t)_{[0, T']} = U(t)_{[0, T']} I(t)_{[0, T]}. \quad (16)$$

Полученный результат, как и предыдущие, в какой-то мере подтверждает возможности аппроксимации математических зависимостей с помощью уникального и универсального средства – рядов Фурье.

Это означает, что выбор интервала разложения (больше или меньше периода напряжения сети) позволяет получить соответствующие комплексы гармоник тока, напряжения и мощности – комплекса, характерного для задач идентификации параметров с использованием энергетических критериев, в основу которых положен принцип – закон сохранения составляющих мгновенной мощности в форме уравнений баланса соответствующих гармоник

Каждый из этих элементов может состоять из

элементов схемы замещения конкретного электромеханического изделия или их совокупности – электрической машины, системы электропривода и т.п.

На основании уравнений баланса составляющих мощности могут успешно решаться задачи идентификации параметров схемы замещения, а также анализа энергетических режимов элементов, входящих в схему замещения. Вопросам разработки метода энергодиагностики (идентификации параметров с использованием энергетических критериев) посвящены многочисленные работы [4, 7, 11, 15, 16, 17, 18]. Характерно при этом, что анализируемый вопрос до настоящего времени не затрагивается зарубежными исследователями. Метод энергодиагностики применим для идентификации как линейных, так и нелинейных систем [21].

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 [17, 20, 21, 22].

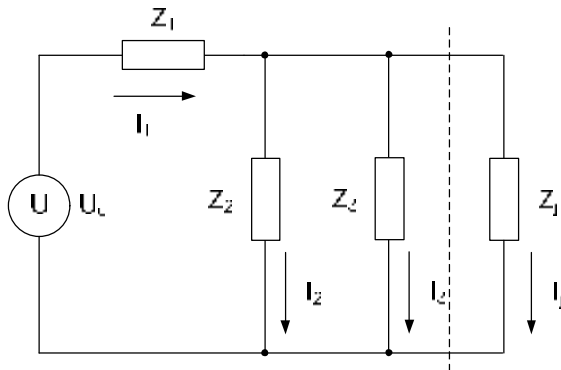


Рисунок 4 – Схема замещения идентифицируемой системы

Условная цепь, на основании которой объясняется принцип энергодиагностики, представлена на рис. 4. Схема содержит источник полигармонического 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. 5.

Выделение статорной и роторной цепей, а также цепи намагничивания связано с конструкцией, особенностями анализа режимов работы электрической машины. На рис. 5 представлена также структура расчетных элементов Z_1, Z_2, Z_3 .

– для индуктивности, зависящей от времени:

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:

$$P_u(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + \mathbf{K} + P_j(t), \quad (17)$$

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

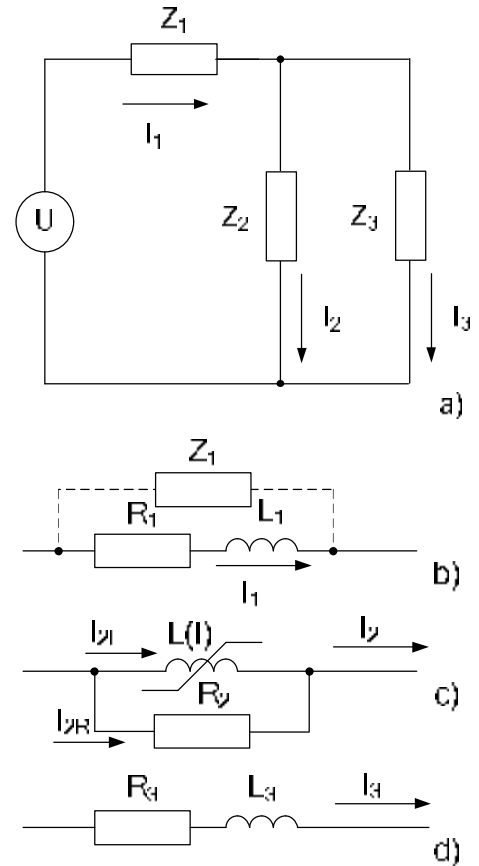


Рисунок 5 – Схема замещения асинхронного двигателя – а; структура расчетных элементов: статорной цепи – б; цепи намагничивания – в; роторной цепи – д

Зависимости для мгновенной мощности наиболее характерных физических элементов имеют такой вид [12, 10, 23, 24]:

– для источника питания:

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

– для активного сопротивления:

$$P_R(t) = I^2(t)R;$$

– для индуктивности:

$$P_L(t) = E(t)I(t) = L \frac{dI(t)}{dt} I(t);$$

– для емкости:

$$P_C(t) = E(t)I(t) = \frac{I(t)}{C} \int I(t) dt;$$

$$U_{\&} = \sum_{n=0}^{n=N} (U_{na} + U_{nb});$$

$$P_L(t) = E(t)I(t) = \frac{d(I(t)L(t))}{dt} \cdot I(t) =$$

$$d \left(I(t) \cdot \left(a_1 + 3a_3 \cdot (I_{3a} \cos(3Wt) + I_{3b} \sin(3Wt)) \right)^2 + \right. ;$$

$$\left. + \mathbf{K} + pa_p \cdot (I_{ma} \cos(mWt) + I_{mb} \sin(mWt)) \right)^{p-1} \cdot I(t) ;$$

– для насыщаемой индуктивности:

$$P_L(t) = E(t)I(t) = \frac{d(I(t)L(I))}{dt} \cdot I(t) =$$

$$= \frac{d(I(t) \cdot (a_1 + 3a_3 \cdot I^2(t) + \mathbf{K} + pa_p \cdot I^{p-1}(t)))}{dt} \cdot I(t) ;$$

– для сопротивления, зависящего от времени:

$$P_R(t) = E(t)I(t) = (I(t)R(t)) \cdot I(t) =$$

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

– для меняющейся во времени емкости:

$$P_C(t) = E(t) \cdot I(t) = \left(\int \frac{I(t)}{C(t)} \right) \cdot I(t) =$$

$$= \left(\int I(t) \left(C_0 + \sum_{q=1}^Q C_{qa} \cos(qWt) + \sum_{q=1}^Q C_{qb} \sin(qWt) \right) dt \right) \cdot I(t) ;$$

где $a_1, a_3, \mathbf{K}, a_p$ – постоянные коэффициенты, получаемые при аппроксимации кривой намагничивания полиномом $\hat{O}(I) = a_1 I + a_3 I^3 + \mathbf{K} + a_p I^{2p+1}$; 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; Q – число составляющих емкости; W – круговая частота сети.

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

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

или

– косинусная составляющая мгновенной мощности канонического порядка:

$$I(t) = \sum_0^M (I_{ma} \cos(mWt) + I_{mb} \sin(mWt)) ,$$

или

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

Здесь и в дальнейшем принята следующая индексация:

m – индекс гармоник тока;

n – индекс гармоник напряжения;

k – индекс гармоник мощности;

a – индекс косинусных составляющих;

b – индекс синусных составляющих.

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 с использованием ЭВМ [24, 25].

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 равенства $k_c = k_s$.

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:

$$P(t) = P_{k0\Sigma} + P_{kac\Sigma}(t) + P_{kbc\Sigma}(t) + P_{kas\Sigma}(t) + P_{kbs\Sigma}(t) , \quad (18)$$

где $P_{k0S} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{n=0}^{N,M} U(t)I(t) \right) dt$ – постоянная составляющая мгновенной мощности;

можно считать допустимым) отпадает необходимость анализа уравнений для косинусных составляющих мгновенной мощности, так как эти уравнения повторяют уравнения для постоянных составляющих (амплитуда косинусных

$$P_{kac\Sigma}(t) = \frac{2}{T} \int_0^T \left(\sum_{\substack{n=m=0 \\ m=n}}^{N,M} U(t)I(t) \right) \cos(k\Omega \cdot t) dt; \quad (19)$$

– синусная составляющая мгновенной мощности канонического порядка:

$$P_{kbc\Sigma}(t) = \frac{2}{T} \int_0^T \left(\sum_{\substack{n=m=0 \\ m=n}}^{N,M} U(t)I(t) \right) \sin(k\Omega \cdot t) dt; \quad (20)$$

– косинусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка:

$$P_{kas\Sigma}(t) = \frac{2}{T} \int_0^T \left(\sum_{\substack{n=m=0 \\ m \neq n}}^{N,M} U(t)I(t) \right) \cos(k\Omega \cdot t) dt; \quad (21)$$

– синусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка:

$$P_{kbs\Sigma}(t) = \frac{2}{T} \int_0^T \left(\sum_{\substack{n=m=0 \\ m \neq n}}^{N,M} U(t)I(t) \right) \sin(k\Omega \cdot t) dt. \quad (22)$$

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

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 $m \pm n = k$ с другой стороны.

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 [7, 11, 14]: при умножении напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$, имеющих в каждом 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 тока, напряжения и 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 [4, 11, 24] 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.

баланса составляющих мгновенной мощности при анализе более широкое, чем, например, уравнения баланса активной мощности или реактивной ее компоненты.

Так, каждая из гармоник 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

Рассмотренный подход к анализу энергопроцессов и составления комплекса идентификационных уравнений полностью может быть использован при любой форме использования операции аппроксимации процесса с

идентификационных задач в условиях, когда такая задача при общепринятом подходе вообще не может быть решена. Так, если период, на котором осуществляется разложение в ряд Фурье, равен периоду гармонического напряжения питания при синусоидальном токе, легко можно определить эквивалентное комплексное сопротивление в соответствии с зависимостью $Z_y = \frac{U}{I}$ и составить три уравнения энергетического баланса в соответствии с теорией мгновенной мощности: уравнение баланса активной мощности, уравнение баланса знакопеременной активной мощности и уравнение баланса знакопеременной синусной (реактивной) мощности [4, 12, 18]. Если учесть, что при гармонических сигналах первых два уравнения баланса равноценны, то становится ясным, что система идентификационных уравнений будет включать лишь два уравнения, которые позволяют идентифицировать лишь параметры простейшей цепи, состоящей из последовательно (или параллельно) включенных активного сопротивления и индуктивности. Таким образом, класс идентификационных задач при гармонических сигналах оказывается нерешаемым.

Отметим здесь также и то, что, если, например, напряжение синусоидально, а ток несинусоидален по причине наличия соответствующих нелинейностей, то задача идентификации энергетическим методом может быть решена в виду существенного увеличения числа уравнений в исходной системе идентификационных уравнений [5, 12, 11]. Здесь уместно также подчеркнуть то обстоятельство, что решаемость системы идентификационных уравнений тем выше, чем больше искажения в исходных компонентах – в напряжении и токе.

Анализ процесса идентификации при произвольном периоде разложения ($T' < T$ или $T'' > T$) показывает на вполне благоприятный исход в виду того, что принципиально значения T' или T'' можно выбрать таковыми, чтобы коэффициенты гармоник в напряжении и токе были весомыми. При этом достаточно период T' принять равным $(0,9 \div 0,85)T$, а период T'' (при $T'' > T$) выше T на $(10 \div 15)\%$.

Отметим при этом, что математический аппарат для идентификации достаточно сложных электрических схем остается неизменным независимо от того, анализируется ли соответствующая схема при питании ее от источника полигармонического напряжения или идентификация осуществляется путем изменения периода, на котором осуществляется

В соответствии со схемой замещения применительно к случаю решения идентификационной задачи для асинхронного двигателя, искомыми параметрами являются индуктивное сопротивление рассеяния статора и ротора x_1 и x_2 (индуктивности L_1 и L_2), индуктивность контура намагничивания L_m , сопротивление ротора R_2 . Активное

Такой подход, по мнению автора, имеет ряд неоспоримых преимуществ и, прежде всего, не требует установки дорогостоящих электротехнических специализированных изделий – генераторов полигармонических сигналов [20, 17, 26].

Интервал разложения (T' или T'') кроме отличия от T может характеризоваться соответствующей фазой периода относительно напряжения питания. Можно отметить важное обстоятельство, касающееся того, что получаемый результат решения идентификационной задачи не зависит от фазы периода разложения относительно напряжения. Единственным условием при производстве операции является синхронное измерение параметров напряжения и тока.

Отмеченная ранее высокая точность определения параметров схемы замещения при использовании энергетического критерия идентификации не снимает с обсуждения вопрос о точности решения задачи при двух вариантах задания периода разложения ($T' < T$ и $T'' > T$), так как с энергетической позиции, рассматриваемые три варианта использования аппарата Фурье, не эквивалентны.

Следовательно, и получаемые результаты заведомо должны отличаться от тех, которые можно получить с использованием источника полигармонического питания. Три рассматриваемые варианта соответствуют разным вариантам питания некоего двухполюсника с соответствующей топологией включения элементов. Мгновенные значения входной мощности двухполюсника во всех трех случаях имеют одно и то же значение при разных частотах напряжения и тока источника питания.

Анализ этого вопроса показывает, что при таких ограничениях со стороны источника энергетическое равновесие системы возможно только при разных значениях параметров, входящих в анализируемую схему замещения.

Этот важнейший вывод позволяет определить приемлемые пути использования получаемых результатов, причем истинные их значения могли бы быть получены при питании от источника с периодом напряжения и тока T , хотя, как следует из наших рассуждений, выполнение задачи идентификации невозможно (по причине малого числа идентификационных уравнений).

Параметры схемы замещения в результате решения задачи идентификации, как показывает анализ, связаны с длительностью периода разложения: для периода разложения $T' < T$ индуктивные сопротивления меньше истинных значений, а для $T'' > T$ – выше.

Известными являются следующие параметры схемы замещения:

- активное сопротивление статора $R_1 = 1,35$ Ом;
- приведенное активное сопротивление ротора $R'_2 = 1,39$ Ом;
- индуктивность рассеяния статора $L_1 = 0,0068$ Гн;
- индуктивность контура намагничивания $L_\mu = 0,25$ Гн;

сопротивление статора предполагается известным, в виду того, что может быть определено прямым измерением. В соответствии со сказанным, для периода разложения в результате решения задачи идентификации получаем разные значения параметров L'_1, L'_2, L'_m, R'_2 - для периода T' и $L''_1, L''_2, L''_m, R''_2$ - для периода T'' . В качестве истинных параметров схемы замещения могут быть взяты среднеарифметические значения:

$$L_1 = \frac{L'_1 + L''_1}{2}; \quad L_2 = \frac{L'_2 + L''_2}{2}; \quad (23)$$

$$L_m = \frac{L'_m + L''_m}{2}; \quad R_2 = \frac{R'_2 + R''_2}{2}. \quad (24)$$

В случае необходимости в зависимости от параметра $DT' = T - T'$ или $DT'' = T - T''$ можно воспользоваться более точными выражениями для L_1, L_2, L_m, R_2 . Подтверждение изложенных теоретических выкладок было осуществлено для нескольких типов асинхронных двигателей с известными, экспериментально определенными параметрами x_1, x_2, x_m, R_2 при питании от источника с синусоидальным напряжением. Измерение осуществлялись с помощью стандартных датчиков напряжения, а также компьютеризированного измерительно-диагностического комплекса (ИДК).

Математический аппарат для идентификации параметров асинхронных двигателей с использованием энергетических критериев разработан в предшествующие годы совместно с аспирантом Ромашихиным Ю.В. [20, 21, 23]. Упомянутый аппарат использовался для определения предварительных данных по методу полигармонического питания. Теоретические аспекты использования метода мгновенной мощности для решения идентификационных задач при полигармоническом питании впервые разработаны автором [21, 10], им же предложен и метод псевдополигармонического воздействия.

В ходе экспериментальных исследований, выполненных применительно к устройству идентификации с реальным физическим источником полигармонического напряжения на базе тиристорного регулятора напряжения, анализировался вопрос о том, как влияет период разложения напряжения и тока на результаты идентификационного процесса. Соответствующие исследования выполнены, как указывалось, и при псевдополигармонических сигналах с разными периодами разложения.

Для физических экспериментов и теоретических исследований использован асинхронный двигатель типа 4А100L6 мощностью 4 кВт, 1500 об/мин.

Как видим, расчетные параметры достаточно близки к фактическим. По существу это означает работоспособность метода по энергетическим

– индуктивность рассеяния роторного контура $L'_2 = 0,0067$ Гн.

На рис. 8 приведены экспериментальные кривые напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$ при питании от тиристорного регулятора от сети синусоидального напряжения.

При классическом подходе период повторяемости и период разложения кривых в ряд Фурье равен $T = 0,02$ с. При излагаемом подходе период разложения формально можно взять каким угодно, например, T' или T'' . В таблице 2 приведены значения параметров двигателя для разложения кривых напряжения и тока в интервале T и $T' = 0,005$ с.

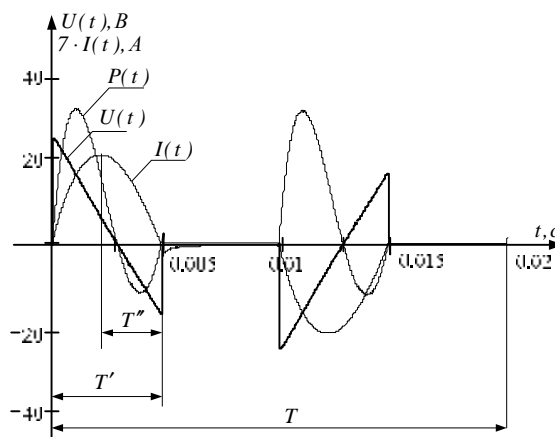


Рисунок 8 – Сигналы напряжения и тока при питании АД от ТРН с углом управления $a = 130^\circ$

Таблица 2 – Значения электромагнитных параметров АД для сигналов с разными значениями периода разложения

Электромагнитные параметры	Каталожные данные двигателя	Расчетные параметры двигателя при угле управления $a = 130^\circ$	
		T	T'
R_1 , Ом	1,35	-	-
R'_2 , Ом	1,39	1,41	1,397
L_1 , Гн	0,0068	0,007	0,00695
L_m , Гн	0,25	0,245	0,271
L'_2 , Гн	0,0067	0,0068	0,00694

заключается в том, что путем изменения периода можно добиться изменения качественных характеристик составляющих разложения –

критериям при вариациях периода разложения.

На первый взгляд, это в некоторой степени парадоксально, однако, если принять во внимание то, что рассматривается мгновенная мощность на том или ином интервале и эта мощность объективно и точно описывает энергопроцесс, то полученный результат – закономерность, вытекающая из закона сохранения.

Другие подходы, естественно, дали бы другие результаты. Это положение трудно переоценить, т.к. оно вытекает из самой сути фундаментального закона природы.

Второй немаловажный аспект, вытекающий из возможности изменения интервала разложения,

Таблица 3 – Значения электромагнитных параметров АД для полигармонического сигнала с периодом T' для различных сочетаний гармоник мгновенной мощности

Параметры и данные АД		Сочетания гармонических в идентификационной системе						
		1,3,5	1,2,3	2,3,6	7,8,9	1,5,7	1,8,9	2,5,9
R_1 , Ом	1,35	-	-	-	-	-	-	-
R'_2 , Ом	1,39	1,397	1,396	1,387	1,383	1,398	1,399	1,397
L_1 , Гн	0,0068	0,00695	0,007	0,0069	0,006	0,0063	0,0063	0,0067
L_m , Гн	0,25	0,271	0,241	0,242	0,229	0,232	0,228	0,237
L'_2 , Гн	0,0067	0,00694	0,0071	0,0069	0,0073	0,0071	0,0071	0,0061

Кажущаяся избыточность уравнений, по существу, является важнейшим преимуществом и стимулом для существенного развития метода идентификации путем введения дополнительных контуров, которые в традиционных схемах замещения, как правило, не представляются: контур вихревых токов в статоре и роторе, вытеснение тока ротора, насыщение стали и др.

Вопросы эти, однако, требуют специального исследования, одной стороной которого должны быть исследования и создание математических моделей для соответствующих контуров.

Этот вопрос, как правило, обходится, в результате чего в исследованиях используется преимущественно Т-образная схема замещения и, естественно, любые изменения характеристик двигателя эквивалентизируются этой схемой, хотя процессы, в общем и целом, к ней фактически не имеют отношения.

Экспериментальные исследования по идентификации с использованием псевдополигармонического питания выполнены в изложенном порядке для разной длительности периода разложения T' .

Расчетные кривые $U(t)$ и $I(t)$ представлены на рис. 9. Данные расчета приведены в табл. 4.

На рис. 10 в окружностях штриховыми линиями показаны предполагаемые кривые зависимости $L_1(T_1)$ и др. При $T_1 = T = 0,02$ с расчетные параметры вообще не определены, так как,

гармонического состава, амплитуд и частот гармоник.

Это позволяет получить такое количество идентификационных уравнений с вполне приемлемыми характеристиками, когда параметры схемы замещения могут быть определены при различных сочетаниях гармоник независимо друг от друга.

Так, например, параметры могут быть определены при использовании гармоник с порядками 1, 3, 5; 2, 3, 6; 1, 8, 9 и т.д.

Число идентификационных уравнений, таким образом, оказывается избыточным. В табл. 3 приведены значения параметров двигателя, полученные при разложении в ряд с периодом T' .

Интервал разложения изменялся от двух периодов до 0,3 периода сетевого напряжения.

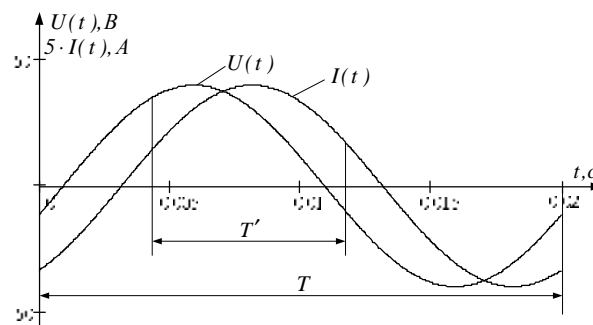


Рисунок 9 – Расчетные сигналы напряжения и тока двигателя для идентификации параметров двигателя

Как и ранее для идентификации использовался энергетический метод на полных уравнениях мгновенной мощности.

Приведенные кривые рис. 10 показывают соответствие приведенных теоретических положений и практических, в том числе и экспериментальных результатов.

составленная изложенным выше образом система идентификационных уравнений вырождается в известные компоненты уравнения мгновенной мощности: активной, знакопеременной косинусной и знакопеременной синусной.

Таблица 4 – Значения электромагнитных параметров при разных периодах разложения

№ п/п	Период T' , с	Частота, Гц	Расчетные параметры двигателя				
			R_1 , Ом	R'_2 , Ом	L_1 , Гн	L_m , Гн	L'_2 , Гн
-	-	-	1,35	1,39	0,0068	0,25	0,0067
1	0,015	66,225	-	1,385	0,00627	0,28	0,00623
2	0,017	59,524	-	1,384	0,00622	0,285	0,00621
3	0,012	84,746	-	1,384	0,00619	0,292	0,006185
4	0,0098	102,041	-	1,383	0,00615	0,295	0,0061
5	0,0068	147,059	-	1,384	0,0061	0,298	0,00605
6	0,04	25	-	1,394	0,0075	0,17	0,0079
7	0,033	30,12	-	1,394	0,0077	0,19	0,0078
8	0,029	35,088	-	1,393	0,0075	0,2	0,0076
9	0,024	41,322	-	1,393	0,0074	0,24	0,0073
10	0,022	45,045	-	1,3925	0,0071	0,245	0,0072

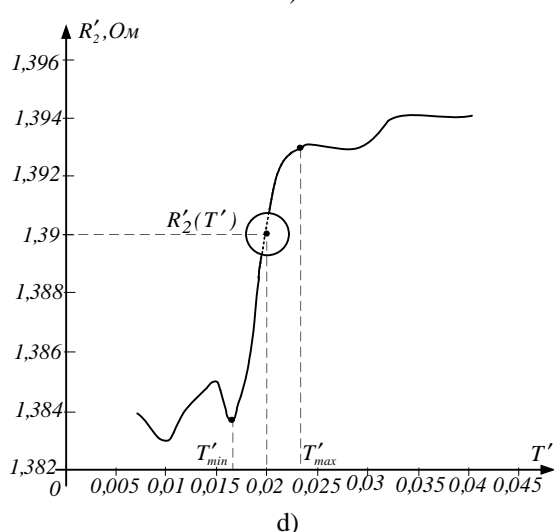
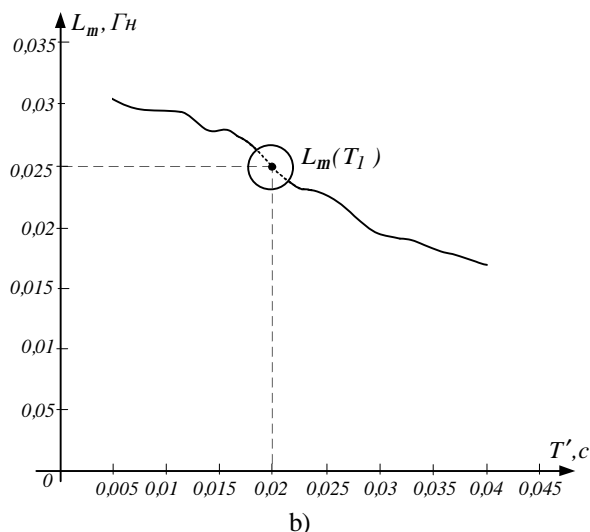
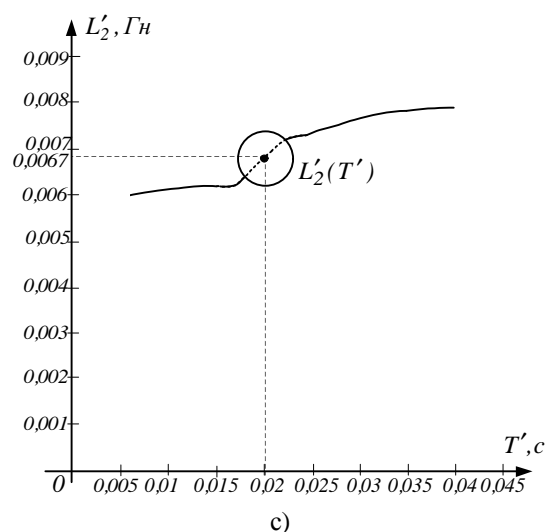
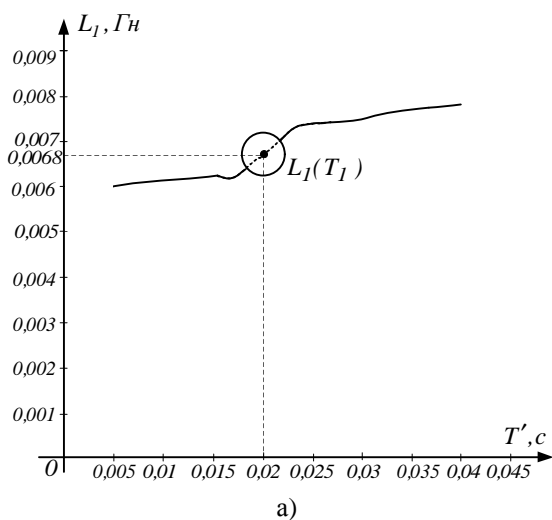


Рисунок 10 – Зависимости расчетных параметров схемы замещения двигателя от периода разложения T' при псевдогармонических сигналах (а – индуктивности L_1 ; б – индуктивности контура намагничивания;

с – индуктивности ротора L'_2 ; д – активного сопротивления ротора R'_2)

Выводы. Приведенные результаты свидетельствуют о создании принципиально нового, эффективного метода идентификации параметров электрических машин и других электротехнических изделий путем использования энергетических критериев и рядов Фурье, базирующихся на разложении сигналов на произвольном промежутке.

Полученные результаты позволяют сформулировать ряд выводов, представляющих интерес для дальнейших теоретических

2. Здор И.Е., Мосьпан В.А., Родькин Д.И. Анализ методов диагностики асинхронных двигателей // Вестник КГПУ. Проблемы создания новых машин и технологий. – Кременчуг, 1998. – №2. –

С. 99–104.

3. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. ГОСТ 7217-87 (СТ СЭВ 168-85). – М.: 1987.

4. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромаши-

исследований эффективности и особенностей практического применения предложенного метода:

– метод псевдополигармонического питания при решении задач идентификационного характера в электромеханике со временем может оказаться эффективным способом реализации задач испытания электрических машин и мониторинга электромеханических систем;

– результаты, мало отличаются от тех, которые получаются при идентификации параметров при питании объекта идентификации от источника полигармонического напряжения, достижимы при применении метода псевдогармонического воздействия, когда период разложения в ряд Фурье гармонических сигналов напряжения и тока не отличаются от периода напряжения сети более чем на $\pm 5 \div 10\%$;

– при меньших пределах отклонения интервала разложения от периода сети из-за ошибок тракта измерения, значения определяемых параметров могут отличаться от достоверно определенных; для получения более достоверных параметров идентифицируемого объекта при псевдополигармоническом воздействии рекомендуется в качестве расчетных величин брать среднее арифметическое того или иного параметра, полученное по результатам решения идентификационной задачи для двух периодов разложения, один из которых на $5 \div 10\%$ меньше периода напряжения сети, а второй – на $5 \div 10\%$ больше его;

– заслуживает внимание свойство систем, идентификационных уравнений, полученных на основании уравнений баланса компонент мгновенной мощности разных гармоник, заключающееся в возможности получения приемлемых результатов при разных сочетаниях комплекса балансовых уравнений. Это создает дополнительную возможность получения информации о функционировании каналов измерительной системы;

– возможный учет того, что кривая мгновенной мощности при гармонических компонентах напряжения и тока также содержит гармонику мощности фиксированной частоты, позволяет при развитии метода существенно упростить процедуру составления системы идентификационных уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высшая школа, 1988. – 231 с.

хин Ю.В. Развитие частотных методов оценки параметров двигателей переменного тока // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2005. – Вип. 4 (33). – С. 43–46.

5. Родькин Д.И. Результаты исследований по диагностике параметров асинхронных двигателей при полигармоническом питании // Вестник КГПУ «Проблемы создания новых машин и технологий». – Кременчук, 2001. – №1. – С. 274–280.

6. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. – К.: Техніка, 1992. – 168 с.

7. Родькин Д.И. Результаты исследований по диагностике параметров асинхронных двигателей при полигармоническом их питании // «Проблемы создания новых машин и технологий»: Научные труды КГПИ. – Кременчук, 2001. – Вып. 2 (11). – С. 274–280.

8. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. – М.: Связь, 1972. – 326 с.

9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

10. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 527 с.

11. Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И., Калинов А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2007. – Вип. 3 (44). – С. 130–136.

12. Родькин Д.И. Уравнения баланса составляющих мгновенной мощности // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2006. – Вип. 4 (39). – Ч. 1. – С. 92–98.

13. Родькин Д.И., Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническим напряжением и током // Электротехника, 2004. – №6. – С. 37–41.

14. 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. – Кременчук, 2006. – Вип. 3 (38). – Ч. 2. – С. 59–72.

15. Родькин Д.И. Принцип суперпозиции в процессах преобразования энергии // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2003. – Вип. 1. – С. 80–85.