

УДК 681.5.015

БАЛАНС МОЩНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКЛЕТОЧНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**Н. А. Руденко, Ю. В. Ромашихин**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: nikita_rudenko@mail.ru

В настоящее время среди многочисленных асинхронных двигателей отдельного внимания заслуживают двухклеточные двигатели благодаря своему широкому использованию в промышленности, а также особенностям конструкции и процессам работы. Оборудование, в котором используются указанные двигатели, предназначено для работы в тяжелых условиях, поэтому они часто выходят из строя и поступают в ремонт. В результате проведения ремонтных операций происходит изменение электромагнитных параметров, которые необходимы для оценки потерь энергии, рабочих и пусковых характеристик, определения послеремонтного паспорта электрической машины. Одним из современных и наиболее эффективных методов определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей является энергетический метод, который основан на уравнениях баланса составляющих гармоник мгновенной мощности источника и элементов схемы замещения. В работе предложена расчетная схема замещения, которая описывает процессы в рабочей и пусковой ветвях ротора двухклеточного двигателя. Предложены зависимости для активных сопротивлений клеток ротора с учетом их изменения в процессе пуска двигателя и с учетом эффекта вытеснения тока. Получена система уравнений баланса составляющих мгновенной мощности для идентификации электромагнитных параметров двухклеточных асинхронных двигателей и показано, что использование энергетического метода позволяет получить для этого необходимое количество уравнений.

Ключевые слова: двухклеточный асинхронный двигатель, вытеснение тока, энергетический метод.

БАЛАНС ПОТУЖНОСТЕЙ У ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДВОКЛІТКОВИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**М. А. Руденко, Ю. В. Ромашихін**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: nikita_rudenko@mail.ru

На сьогодні серед численних асинхронних двигунів окремої уваги заслуговують двокліткові двигуни завдяки своєму широкому використанню в промисловості, а також особливостям конструкції і процесам роботи. Обладнання, в якому використовуються зазначені двигуни, призначено для роботи у важких умовах, тому вони часто виходять із ладу й надходять у ремонт. У результаті проведення ремонтних операцій відбувається зміна електромагнітних параметрів, які необхідні для оцінки втрат енергії, робочих і пускових характеристик, визначення післяремонтного паспорта електричної машини. Одним із сучасних і найбільш ефективних методів визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів є енергетичний метод, який заснований на рівняннях балансу складових гармонік миттєвої потужності джерела й елементів схеми заміщення. У роботі запропоновано розрахункову схему заміщення, яка описує процеси в робочому й пусковому колах ротора двокліткового двигуна. Запропоновано залежності для активних опорів клітин ротора з урахуванням їх зміни в процесі пуску двигуна й з урахуванням ефекту витіснення струму. Отримано систему рівнянь балансу складових миттєвої потужності для ідентифікації електромагнітних параметрів двокліткових асинхронних двигунів і показано, що використання енергетичного методу дозволяє отримати для цього необхідну кількість рівнянь.

Ключові слова: двоклітковий асинхронний двигун, витіснення струму, енергетичний метод.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время среди многочисленных асинхронных двигателей (АД), задействованных в разных отраслях промышленности, отдельного внимания заслуживают двухклеточные АД благодаря своему широкому использованию в промышленности, а также особенностям конструкции и процессам работы [1]. Двухклеточные АД применяются как часть привода буровых установок типа MD, врубовых машин типа EL, комбайнов непрерывного действия типа CM, комплексов глубокой разработки пластов HW300. Следует отметить, что оборудование, в котором используются двухклеточные двигатели, предназначено для работы в тяжелых условиях [1].

Двухклеточные АД применяют [2, 3]:

– в электроприводах, работающих в повторно-кратковременных режимах работы с частыми пусками. Исследования показали, что двигатели с двухслойным ротором допускают число пусков подряд в 3–5 раз больше, чем двигатели с короткозамкнутым ротором, что обеспечивает более высокую надежность работы и производительность механизма;

– в электроприводах, работающих в продолжительных режимах работы с тяжелыми пусками. В основном это приводы, питание которых осуществляется через длинные линии с повышенным падением напряжения, а также автономные электроэнергетические системы, где мощность двигателей соизмерима с мощностью генераторов;

– в електроприводах, требующих большого начального пускового момента или стоянки под током короткого замыкания.

Однако, несмотря на достаточно высокие эксплуатационные показатели, периодически АД выходят из строя и подвергаются ремонту [4–10]. В результате проведения ремонтных операций, а также при длительной эксплуатации АД, особенно в тяжелых или ненормальных режимах работы, электромагнитные параметры (ЭМП) двигателей могут отличаться от тех, которые заложены заводом-изготовителем [4, 5]. В свою очередь, ЭМП АД необходимы для оценки потерь энергии, рабочих и пусковых характеристик, определения послеремонтного паспорта электрической машины, поэтому особого внимания заслуживают вопросы определения ЭМП двухклеточных и глубокопазных АД ввиду особенностей конструкции и протекающих в них процессов.

Для определения ЭМП двухклеточных АД необходимо использовать современный и эффективный метод. Этим методом может являться энергетический метод, который основан на уравнениях баланса составляющих гармоник мгновенной мощности источника и элементов схемы замещения.

Целью данной работы является выявление особенностей формирования идентификационных уравнений энергетического метода при определении электромагнитных параметров двухклеточных асинхронных двигателей.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенность конструкции двухклеточных АД заключается в том, что ротор имеет две короткозамкнутые обмотки [11]. Наружная клетка является пусковой и выполнена из стержней малого поперечного сечения, обладающих повышенным активным сопротивлением. Внутренняя клетка является основной рабочей обмоткой двигателя и выполнена из стержней сравнительно большого поперечного сечения, обладающих малым активным сопротивлением.

Индуктивные сопротивления клеток определяются значениями потоков рассеяния, сцепленных с их стержнями [12]. Так как пусковая клетка расположена близко к поверхности ротора, то сцепленные с ее стержнями потоки рассеяния сравнительно невелики и она обладает малым реактивным сопротивлением. Рабочая клетка, наоборот, удалена от поверхности ротора, поэтому имеет большое реактивное сопротивление. Увеличение реактивного сопротивления рабочей клетки обеспечивается благодаря соответствующему выбору ширины и высоты паза ротора, а также выбору зазора между стержнями обеих клеток. Для повышения активного сопротивления пусковой клетки стержни обычно изготавливают из марганцовистой латуни или бронзы. Стержни рабочей клетки и торцовые короткозамыкающие кольца выполняют из меди, в некоторых случаях обе обмотки объединяют и выполняют литыми из алюминия. В электрическом отношении обе

клетки включены параллельно, вследствие чего ток ротора распределяется между ними обратно пропорционально их полным сопротивлениям.

В начальный момент пуска, когда скольжение двигателя равно единице и частота тока в роторе максимальна, индуктивные сопротивления клеток во много раз больше их активных сопротивлений, поэтому ток начинает протекать, в основном, по рабочей клетке [13, 14]. По мере разгона ротора уменьшается скольжение, поэтому изменяются индуктивные сопротивления и распределение тока между клетками, ток начинает постепенно переходить из пусковой клетки в рабочую. По окончании процесса разгона величина скольжения становится малой, роль реактивных сопротивлений в токораспределении оказывается незначительной, и ток начинает проходить, в основном, по рабочей клетке.

Таким образом, в рассматриваемом двигателе ток в начальный момент пуска вытесняется в наружную пусковую клетку, создающую большой пусковой момент, а по окончании процесса пуска – проходит по рабочей клетке с малым активным сопротивлением, вследствие чего двигатель работает с высоким КПД.

Однако в силу особенностей конструкции АД с двойной беличьей клеткой и протекающими физическими процессами в роторе становится затруднительным точно и адекватно определить ЭМП известными методами.

В настоящее время известны следующие методы диагностики асинхронных двигателей, получившие широкое распространение на практике [15–18]:

- вибрационный метод оценки технического состояния электродвигателя – является достаточно дорогим и трудоемким, требующим применения специальной измерительной техники и программного обеспечения. Кроме того, должен быть обеспечен доступ к обследуемому объекту, что в некоторых случаях сопряжено с определенными организационными и техническими трудностями;

- спектр-токовый метод – позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов двигателя. Проведение мониторинга тока электродвигателя может быть выполнено как непосредственно на нем, так и в электрошите питания (управления).

Следует отдельно выделить метод идентификации ЭМП АД при полигармоническом питании [19]. Этот метод основан на использовании уравнений баланса гармонических составляющих мощности на источнике питания и на элементах схемы замещения и называется энергетическим [20].

Уравнение баланса мгновенной мощности одной фазы двигателя составляется в виде равенств составляющих мгновенной мощности источника питания и составляющих мгновенной мощности всех элементов АД [21]. В качестве элементов АД выступают активные и индуктивные сопротивления ветвей статора, ротора и ветки намагничивания Т-образной схемы замещения.

Для точного определения роторных сопротивлений при идентификации ЭМП двухклеточных АД с применением энергетического метода необходимо учитывать особенности конструкции двигателя: двойную короткозамкнутую беличью клетку ротора и наличие эффекта вытеснения тока в роторе.

Следует отметить, что для получения нужного гармонического состава мгновенной мощности при использовании энергетического метода определения ЭМП АД необходимо наличие источника полигармонического питания.

Процедура идентификации ЭМП АД с использованием энергетического метода сводится к следующему (рис. 1):

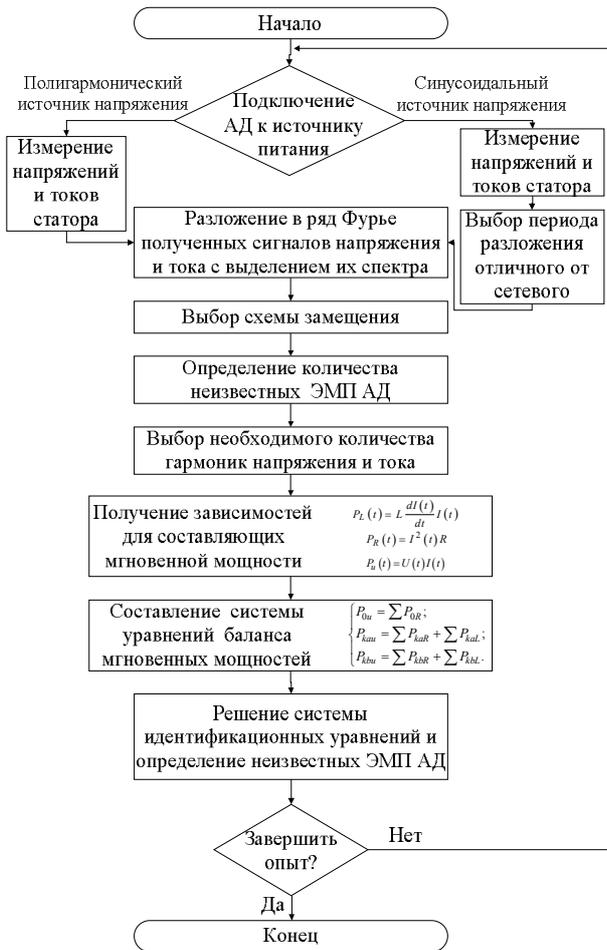


Рисунок 1 – Процедура идентификации ЭМП АД

– испытуемый двигатель подключают к источнику полигармонического напряжения и проводят измерение напряжений и токов статора;

– полученные сигналы напряжения и тока представляют в виде тригонометрических рядов с помощью преобразования Фурье и выделяют спектр указанных сигналов;

– выбирают расчетную схему замещения с учетом типа АД и протекающих в нем физических процессов;

– получают зависимости для составляющих

мгновенной мощности на источнике полигармонического напряжения и элементах схемы замещения;

– формируют систему идентификационных уравнений;

– определяют неизвестные параметры схемы замещения и гармоник токов в соответствующих цепях.

Как видно из рис. 1, в зависимости от имеющегося источника напряжения, полигармонического или синусоидального, можно либо сразу же приступить к разложению в ряд Фурье, либо сначала потребуется преобразовать синусоидальный сигнал в «псевдополигармонический», выбрав соответствующий период разложения [21].

После нахождения неизвестных ЭМП АД процедуру определения параметров можно завершить либо же выполнить повторно ещё несколько опытов для получения усреднённых результатов.

Применительно к двухклеточным АД для реализации энергетического метода при идентификации ЭМП необходимо наличие схемы замещения, которая отображает физические процессы в клетках ротора.

Таким образом, для использования энергетического метода с целью определения ЭМП двухклеточных АД предлагается использовать схему замещения, представленную на рис. 2, которая содержит цепь статора, контур намагничивания, пусковую и рабочую цепи ротора.

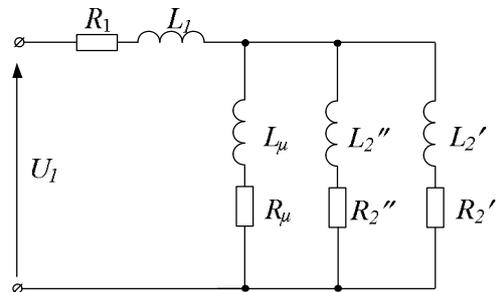


Рисунок 2 – Схема замещения двухклеточного АД

Согласно методам, известным из работ [20, 21], активное сопротивление ротора зависит не только от скольжения, но и от эффекта вытеснения тока. Поэтому активное сопротивление пусковой цепи ротора может быть представлено в виде

$$R'_2 = R'_{20} (1 + \beta s) / s ,$$

где R'_{20} – сопротивление пусковой клетки ротора при частоте, равной нулю; s – скольжение двигателя; β – коэффициент, который зависит от формы и материала пазов АД и определяет влияние эффекта вытеснения тока.

В свою очередь коэффициент β можно записать через уравнение глубины проникновения тока [20, 21]:

$$\beta = \sqrt{\frac{2}{\Omega \gamma \mu}} ,$$

где Ω – угловая частота тока; γ – электрическая проводимость материала; μ – магнитная проницаемость материала. Ниже на графике представлена зависимость коэффициента β от угловой частоты тока.

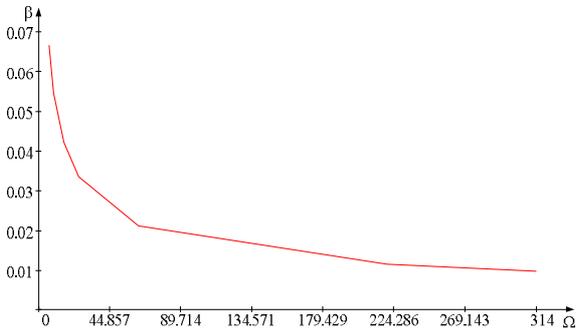


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента вытеснения тока от угловой частоты

Активное сопротивление рабочей цепи ротора:

$$R_2'' = R_{20}'' / s,$$

где R_{20}'' – сопротивление рабочей цепи ротора при частоте, равной нулю.

Эффект вытеснения тока учитывается в пусковой цепи ротора и выражается через коэффициент β , который будет возрастать по мере разгона двигателя. Наибольшее влияние эффект вытеснения тока будет иметь в пусковой клетке ротора при выходе двигателя в номинальный режим работы ($s=0,05-0,02$), в то время как активное сопротивление рабочей клетки ротора примет малое значение. Это соответствует тому, что в начальный момент пуска ток протекает в основном в пусковой цепи [11–14], а при разгоне АД ток перераспределяется и протекает в основном по рабочей клетке, когда значение β увеличивается. Поэтому для активных сопротивлений пусковой ($R_{20}' = 45 \text{ Ом}$) и рабочей ($R_{20}'' = 7 \text{ Ом}$) ветвей ротора двухклеточного АД серии ВАН (АВ) с номинальной мощностью 5,5 кВт, а также для полных сопротивлений данных ветвей ($z_2' = R_2' + jX_2'$; $z_2'' = R_2'' + jX_2''$, где $X_2' = \Omega L_2'$; $X_2'' = \Omega L_2''$; $L_2' = 0,03 \text{ Гн}$; $L_2'' = 0,9 \text{ Гн}$) были построены графики зависимости от скольжения.

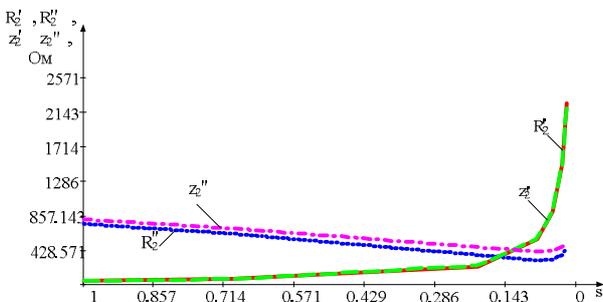


Рисунок 4 – Зависимость полных сопротивлений пусковой и рабочей ветвей ротора от скольжения

При сравнении графиков зависимости активных и полных сопротивлений от скольжения видно, что при уменьшении частоты тока в роторе двухклеточного АД сопротивление пусковой цепи ротора увеличивается, а рабочей – уменьшается, что соответствует физическим процессам, протекающим в роторе двухклеточных АД.

Следует отметить, что для определения ЭМП двухклеточных АД с применением энергетического метода и разделением значений активных сопротивлений ротора необходимо учитывать эффект вытеснения тока только в одной из цепей ротора [22]. Это связано с необходимостью разделения активных сопротивлений ротора при их идентификации.

Использование полученных выражений для активных сопротивлений ротора позволит разделить цепи двухклеточного ротора.

Таким образом, с учетом вышеизложенного, появляется возможность составить систему идентификационных уравнений для определения ЭМП двухклеточных АД с использованием энергетического метода.

В табл. 1 и 2 показано количество идентификационных уравнений и количество определяемых параметров АД для предложенной схемы замещения (рис. 2).

Таблица 1 – Количество уравнений системы в зависимости от числа гармоник и неизвестных параметров

Количество гармоник напряжения и тока	Количество неизвестных параметров	Количество уравнений
2	7	7
3	7	11
4	7	15
k	7	4k-1
С учетом составляющих токов в контурах ротора и контура намагничивания		
2	7+12	7+4
3	7+18	11+6
4	7+24	15+8
k	7+6k	(4k-1)+2k

Таблица 2 – Количество уравнений по каноническим и неканоническим составляющим мгновенной мощности в зависимости от числа гармоник

Число гармоник напряжения и тока	Количество канонических уравнений	Количество неканонических составляющих	Общее количество уравнений
2	5	4	9
3	7	8	15
4	9	12	21
k	2k+1	4(k-1)	2k+1+4(k-1)

Исходя из данных, представленных в табл. 1 и 2, количество неизвестных параметров для предложенной схемы замещения (рис. 2) составляет 37. К неизвестным параметрам относятся: индуктивное сопротивление статора (L_1), индуктивное (L_μ) и активное (R_μ) сопротивления контура намагничивания, индуктивные (L'_2 , L''_2) и активные (R'_2 , R''_2) сопротивления рабочей и пусковой цепей ротора, токи в пусковой и рабочей цепях ротора, а также ток в контуре намагничивания (I_{iak} , I_{ibk}). Таким образом, для нахождения всех неизвестных ЭМП АД необходимо составить 37 уравнений баланса мощностей. Для этого нужно использовать пять гармоник напряжения и тока.

Для предложенной схемы замещения (рис. 2), используя наиболее значимые гармоники спектра тока и напряжения: первую, третью, пятую, седьмую и девятую гармоники, – были получены уравнения баланса мгновенных мощностей. Ниже представлены уравнения баланса мгновенных мощностей в общем виде:

$$\begin{cases} P_{0ucm} = P_{0R_1} + P_{0R_\mu} + P_{0R'_2} + P_{0R''_2}; \\ P_{kaucm} = P_{kaR_1} + P_{kaR_\mu} + P_{kaR'_2} + P_{kaR''_2} + \\ + P_{kaL_1} + P_{kaL_\mu} + P_{kaL'_2} + P_{kaL''_2}; \\ P_{kbuscm} = P_{kbR_1} + P_{kbR_\mu} + P_{kbR'_2} + P_{kbR''_2} + \\ + P_{kbL_1} + P_{kbL_\mu} + P_{kbL'_2} + P_{kbL''_2}. \end{cases}$$

Составляющие мгновенной мощности на источнике полигармонического напряжения представляются зависимостями:

$$\begin{aligned} P_{0\Sigma} &= \frac{1}{2} \left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1an} U_{1am} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1bn} U_{1bm} \right]; \\ P_{ka\Sigma} &= \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1an} U_{1am} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1an} U_{1am} + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1bn} U_{1bm} - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1bn} U_{1bm} \right); \\ P_{kb\Sigma} &= \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1bn} U_{1am} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1bn} U_{1am} + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1an} U_{1bm} - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1an} U_{1bm} \right). \end{aligned}$$

В связи с тем, что активные сопротивления цепей схемы замещения имеют различные зависимости, ниже приведены зависимости для мгновенных мощностей на активных сопротивлениях каждой из цепей, где i – индекс, обозначающий ветвь статора или ветвь намагничивания:

$$P_{0R_i} = \frac{1}{2} R_i \sum_{n=1}^N I_{ian}^2;$$

$$\begin{aligned} P_{0R'_2} &= \frac{1}{2} R'_{20} \sum_{n=1}^N ((1 + \beta s) / s) I_{R'_2'an}^2; \\ P_{0R''_2} &= \frac{1}{2} R''_{20} \sum_{n=1}^N (1 / s) I_{R''_2'an}^2; \\ P_{kaR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N 4 I_{ian} I_{iam} - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N 4 I_{ian} I_{iam} - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N 4 I_{ibn} I_{ibm} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N 4 I_{ibn} I_{ibm} + \sum_{n=1}^N I_{ian}^2 \right); \\ P_{kaR'_2} &= R'_{20} \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{s_n + s_m + 2\beta s_n s_m}{s_m s_n} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(2 I_{R'_2'an} I_{R'_2'am} - 2 I_{R'_2'bn} I_{R'_2'bm} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{s_n + s_m + 2\beta s_n s_m}{s_m s_n} \right) \left(2 I_{R'_2'bn} I_{R'_2'bm} - 2 I_{R'_2'an} I_{R'_2'am} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=1}^N \left(\frac{(1 + \beta s_n)}{s_n} \right) I_{R'_2'an}^2 \right); \\ P_{kaR''_2} &= R''_{20} \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{s_m} + \frac{1}{s_n} \right) \left(2 I_{R''_2'an} I_{R''_2'am} - 2 I_{R''_2'bn} I_{R''_2'bm} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{s_m} + \frac{1}{s_n} \right) \left(2 I_{R''_2'bn} I_{R''_2'bm} - 2 I_{R''_2'an} I_{R''_2'am} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=1}^N (1 / s_n) I_{R''_2'an}^2 \right); \\ P_{kbR_i} &= R_i \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N 4 I_{ibn} I_{iam} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N 4 I_{ibn} I_{iam} + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N 4 I_{ian} I_{ibm} - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N 4 I_{ian} I_{ibm} + \sum_{n=1}^N I_{ibn}^2 \right); \\ P_{kbR'_2} &= R'_{20} \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{s_n + s_m + 2\beta s_n s_m}{s_m s_n} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(2 I_{R'_2'bn} I_{R'_2'bm} + 2 I_{R'_2'an} I_{R'_2'bm} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{s_n + s_m + 2\beta s_n s_m}{s_m s_n} \right) \left(2 I_{R'_2'bn} I_{R'_2'bm} - 2 I_{R'_2'an} I_{R'_2'bm} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=1}^N \left(\frac{(1 + \beta s_n)}{s_n} \right) I_{R'_2'bn}^2 \right); \end{aligned}$$

$$P_{kbR_2''} = R_{20}'' \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n, m < n}}^N \left(\frac{1}{s_m} + \frac{1}{s_n} \right) \right) \times \\ \times \left(2I_{R_2''bn} I_{R_2''am} + 2I_{R_2''an} I_{R_2''bm} \right) + \\ + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m < n}}^N \left(\frac{1}{s_m} + \frac{1}{s_n} \right) \left(2I_{R_2''bn} I_{R_2''am} - 2I_{R_2''an} I_{R_2''bm} \right) + \\ + \sum_{\substack{n=1 \\ k=2n}}^N \frac{1}{s_n} I_{R_2''bn}^2,$$

где U_{1m} – амплитуда гармонической составляющей напряжения; I_{im}, I_{in} – амплитуды гармоник тока соответствующего контура порядка m и n ; a и b – косинусная и синусная составляющие; $f_R(v_m), f_R(v_n)$ – функции зависимости активных сопротивлений от частоты тока соответствующего контура (для контура статора и контура намагничивания $f_R(v_m)$ и $f_R(v_n)$ равны единице, для контура рабочей обмотки ротора – $1/s$, а для контура пусковой обмотки ротора – $(1+\beta s)/s$; n – номер гармоники токов I_{ian} и I_{ibn} ; m – номер гармоники токов I_{iam} и I_{ibm} ; $s_v = 1 \mp \frac{1-s_1}{v}$ – скольжение на гармонике тока, где v – номер гармоники (m или n); s_1 – скольжение двигателя на первой гармонике; N и M – число гармоник; Ω – частота сети; k – номер гармоник мощности.

Мгновенная мощность на индуктивности в общем виде для всех ветвей схемы замещения имеет следующий вид:

$$P_{0\Sigma} = 0; \\ P_{ka\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n, m < n}}^N k I_{ibn} I_{iam} + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m < n}}^N k I_{ibn} I_{iam} + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n}}^N k I_{ian} I_{ibm} - \right. \\ \left. - \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m < n}}^N k I_{ian} I_{ibm} + \sum_{n=1}^N \frac{k}{2} I_{ibn}^2 \right); \\ P_{kb\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} \left(- \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n, m < n}}^N k I_{ian} I_{iam} - \right. \\ \left. - \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m < n}}^N k I_{ian} I_{iam} + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n}}^N k I_{ibn} I_{ibm} - \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m < n}}^N k I_{ibn} I_{ibm} + \sum_{n=1}^N \frac{k}{2} I_{ian}^2 \right).$$

Определение ЭМП двухклеточных АД с применением энергетического метода выполняется для двух режимов работы: при заторможенном роторе ($s=1$) и на холостом ходу ($s \rightarrow 0$).

Таким образом, разработанный математический аппарат может быть использован при определении ЭМП двухклеточных АД с помощью энергетического метода.

ВЫВОДЫ. 1. Повышение точности определения ЭМП двухклеточных АД достигается учетом в схеме замещения коэффициентов, отражающих физические процессы и эффект вытеснения тока в роторе.

2. Система уравнений идентификации ЭМП, составленная на основе уравнений составляющих мгновенной мощности на источнике и схеме замещения, соответствует закону сохранения энергии и позволяет анализировать параметры схемы замещения с учетом особенностей конструкции двухклеточных АД.

3. На основании полученных в общем виде выражений для активной (постоянной) и знакопеременных (косинусной и синусной) составляющих гармоник мгновенной мощности можно получить выражения для любого элемента схемы замещения двухклеточного АД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дайнеко В.А., Ковалинский А.И. Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий: учебное пособие. – Минск: Новое знание, 2008. – 320 с.
2. Сивокобыленко В.Ф., Кузьменко Д.И., Яременко С.П. Диагностика стержней двухклеточных и глубокопазных короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – Вип. 10/2011 (180). – С. 4–8.
3. Усольцев А.А. Общая электротехника: учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.
4. Duran M.J., Duran J.L., Perez F., Fernandez J. Induction-Motor Sensorless Vector Control with Online Parameter Estimation and Overcurrent Protection // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – Iss. 53. – № 1. – PP. 154–161.
5. Holtz J. Sensorless Control of Induction Machines – With or Without Signal Injection // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – Iss. 53. – № 1. – PP. 7–30.
6. Акимова Н.А., Котеленец Н.Ф., Сентюрихин Н.И. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования. – М.: Академия, 2008. – 300 с.
7. Голубева А.М. Анализ проблемы диагностики асинхронных двигателей с поврежденным короткозамкнутым ротором. – 2007 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mehatronics.ru/2011/06/analiz-problemy-diagnostiki-asinkhro/>
8. Бабурин С.В., Жуковский В.Л., Коржев А.А., Кривенко А.В. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова, 2009. – С. 34–38.
9. Елифанцев Ю.А., Полищук С.В. Мониторинг и диагностика механических объектов. – Новокуз-

нецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2009. – 61 с.

10. Хвостиченко С.Б., Якобсон П.П. Диагностика динамического оборудования: внедрение и эффективность // Химическая техника. – Вып. 1/2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/statiy/Diagnostika%20dinamicheskogo%20oborudovaniya.pdf>

11. Шабанов В.А. Основы регулируемого электропривода основных механизмов бурения, добычи и транспорта нефти. – Уфа: УГНТУ, 2009. – 156 с.

12. Епифанов А.П. Основы электропривода: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 192 с.

13. Лифанов В.А., Помогаев Г.В. Электрические машины переменного тока: учебное пособие. – Челябинск: ЮУрГУ, 2007. – 132 с.

14. Усольцев А.А. Электрические машины: учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 416 с.

15. Седуниев А.М., Афанасьев Д.О., Сидельников Л.Г. Методы диагностики асинхронных двигателей. – Пермь: Пермский государственный технический университет, ООО «ТестСервис» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://testslg.ru/images/pdf/18_metody-diagnosticsi-asin-khronnykh-dvigatelj.pdf

16. Петухов В.С. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости электротехники. – 2008. – Вып. 1/2008 (49). – С. 50–52.

17. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального

анализа потребляемого тока // Новости электротехники. – 2005. – Вып. 1/2005 (31). – С. 50–52.

18. Бабуринов С.В., Жуковский В.Л., Коржев А.А., Кривенко А.В. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин. – Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 9. – С. 34–38.

19. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. – New Jersey, 2007. – 379 p.

20. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашин Ю.В. Оценка эффективности методов диагностики двигателей переменного тока // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2006. – Вип. 3/2006 (38). – С. 77–82.

21. Родькин Д.И. Особенности применения энергетического метода идентификации двигателей переменного тока при псевдополигармонических сигналах // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2009. – Вип. 1/2009 (5). – С. 7–20.

22. Родькин Д.И., Здор И.Е., Черный А.П. Инженерные методы определения параметров асинхронных двигателей // Сборник научных трудов Кременчугского государственного политехнического института «Проблемы создания новых машин и технологий». – Кременчук: КГПИ, 1999. – Вып. 1. – С. 16–22.

BALANCE EQUATIONS OF INSTANTANEOUS POWER IN THE TASKS OF IDENTIFICATION PARAMETERS OF DOUBLE CAGE INDUCTION MOTORS

N. Rudenko, Yu. Romashykhin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Persvomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: nikita_rudenko@mail.ru

Currently, among the numerous induction motors double cage induction motors deserve special attention due to their widespread use in industry, as well as design features and processes work. Machines which use these engines are designed to operate in difficult conditions, so they often fail and come in for repair. As a result of repair operations electromagnetic parameters are changed, which are needed for estimating the loss of energy, workers, and the starting characteristics, determining post repair passport of electric machine. One of the modern and the most effective methods for the determination of electromagnetic parameters of induction motors is the energy method, which is based on the balance equations of harmonic components of instantaneous power at the source and at the elements of the equivalent circuit. The work presents equivalent circuit, which describes the processes in the working and start-up branches of double cage induction motor. There are relations shown for the active resistances of the rotor cages with their changes in the process of starting the motor and accounting the effect of the displacement current. There is a system received of balance equations of components of instantaneous power for the identification of the electromagnetic parameters of double cage induction motors and it is shown that the use of the energy method allows to obtain for this the required amount of equations.

Key words: double cage induction motor, the displacement current, the energy method.

REFERENCES

1. Dayneko, V.A. and Kovalinsky, A.I. (2008), *Elektrooborudovaniye selskokhozyaystvennykh predpriyatiy. Uchebnoye posobiye* [Electrical equipment of agricultural enterprises. Textbook.] Novoye znaniye, Minsk. (in Russian)

2. Sivokobylenko, V.F., Kuzmenko, D.I. and Jaremenko, S.P. (2011), “Rods diagnosis of bicellular and deep-bar squirrel cage rotors of induction motors”, *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: “Elektrotehnika i enerhetyka”*, Vol. 10, no. 180, pp. 4–8. (in Russian)

3. Usoltsev, A.A. (2009), *Obshchaya elektrotekhnika: Uchebnoye posobiye* [Electrical engineering in general: textbook], ITMO, St. Petersburg. (in Russian)
4. Duran, M.J., Duran, J.L., Perez, F. and Fernandez, J. (2006), "Induction-Motor Sensorless Vector Control with Online Parameter Estimation and Overcurrent Protection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, no. 1, pp. 154–161.
5. Holtz, J. (2006), "Sensorless Control of Induction Machines – With or Without Signal Injection?", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, no. 1, pp. 7–30.
6. Akimova, N.A., Kotelenets, N.F. and Sentyurihin, N.I. (2008), *Montazh, tekhnicheskaya ekspluatatsiya i remont elektricheskogo i elektromekhanicheskogo oborudovaniya*. [Installation, maintenance and repair of electrical and electromechanical equipment], Akademiya, Moscow. (in Russian)
7. Golubeva, A.M. (2007), "Analysis of the problem of diagnosis of induction motors with damaged squirrel-cage rotor" [Electronic resource], available at: <http://mehatronics.ru/2011/06/analiz-problemy-diagnostiki-asinkhro/> (accessed June 15, 2014)
8. Baburin, S.V., Zhukovsky, V.L., Korzhev, A.A. and Kryvenko, A.V. (2009), *Sovremennyye metody nerazrushayushchego kontrolya i diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya elektroprivodov gornykh mashin* [Modern methods of nondestructive testing and diagnostics of technical state of electric mining machines], Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy gornyy institut im. G.V. Plekhanova, St. Petersburg. (in Russian)
9. Epifantsev, Y.A. and Polishchuk, S.V. (2009), *Monitoring i diagnostika mekhanicheskikh obyektov* [Monitoring and diagnostics of mechanical objects] Siberian State Industrial University, Novokuznetsk. (in Russian)
10. Khvostichenko, S.B. and Jacobson, P.P. (2009), "Diagnosis of dynamic equipment: implementation and effectiveness", *Khimicheskaya tekhnika*, Vol. 1 [Electronic resource], available at: <http://www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/statiy/Diagnostika%20dinamicheskogo%20oborudovaniya.pdf> (accessed June 15, 2014)
11. Shabanov, V.A. (2009), *Osnovy reguliruyemogo elektroprivoda osnovnykh mekhanizmov bureniya, dobychi i transporta nefi* [Fundamentals of the basic mechanisms of regulated electric drilling, production and transportation of oil], UGNTU, Ufa. (in Russian)
12. Yepifanov, A.P. (2009), *Osnovy elektroprivoda: uchebnoye posobiye* [Fundamentals of electric drive: textbook], Izdatelstvo "Lan", St. Petersburg. (in Russian)
13. Lifanov, V.A. and Pomogayev, G.V. (2007), *Elektricheskiye mashiny peremennogo toka: uchebnoye posobiye* [Electrical Machines AC power: textbook], Izdatelstvo YuUrGU, Chelyabinsk. (in Russian)
14. Usoltsev, A.A. (2013), *Elektricheskiye mashiny: uchebnoye posobiye* [Electrical machinery: textbook], NIU ITMO, St. Petersburg. (in Russian)
15. Sedunin, A.M., Afanasiev, D.O. and Sidelnikov, L.G., *Metody diagnostiki asinkhronnykh dvigateley*, [Methods of diagnosis of induction motors] Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, Perm, Russia [Electronic resource], available at: http://testslg.ru/images/pdf/18_metody-diagnostiki-asinkhronnykh-dvigatelj.pdf (in Russian) (accessed June 11, 2014)
16. Petukhov, V.S. (2008), "Spectral analysis of the magnitude of current and voltage Park", *Novosti elektrotekhniki*, Vol. 1, no. 49, pp. 50–52. (in Russian)
17. Petukhov, V.S. and Sokolov, V.A. (2005), "Diagnostics status motors. Spectral analysis of current consumption", *Novosti elektrotekhniki*, Vol. 1, no. 31, pp. 50–52. (in Russian)
18. Baburin, S.V., Zhukovsky, V.L., Korzhev, A.A. and Kryvenko, A.V. (2009), "Modern methods of non-destructive testing and diagnostics of technical state of electric mining machinery", *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika*, Vol. 9, pp. 34–38. (in Russian)
19. Akagi, H., Watanabe, E.H. and Aredes, M. (2007), *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
20. Rodkyn, D.I., Kalinov, A.P. and Romashykhin, Yu.V. (2006), "Estimation of efficiency of diagnostic methods of AC motors", *Visnyk KDPU*, Vol. 3, no. 38, pp. 77–82. (in Russian)
21. Rodkyn, D.I. (2009), "Features of the application of the energy method of identification of AC motors with pseudopolyharmonic signals", *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy. Kremenuchuk: KDPU im. M. Ostrohradskoho*, Vol. 1, no. 5, pp. 7–20. (in Russian)
22. Rodkyn, D.I., Zdor, I.E. and Chernyy, A.P. (1999), "Engineering methods for determining the parameters of induction motors", *Sbornik nauchnykh trudov Kremenchugskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta «Problemy sozdaniya novykh mashin i tekhnologiy»*, Vol. 1, pp. 16–22. (in Russian)

Стаття надійшла 13.08.2014.