

УДК 621.313

БЕЗДАТЧИКОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО ЭЛЕМЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Р.Р. Гибадуллин, А.Н. Цветков, И.В. Ившин, Л.В. Долومانюк

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

torianin@mail.ru

Резюме: В статье описан бездатчиковый метод определения положения подвижного элемента (ПЭ) электрических машин возвратно-поступательного действия (ЭМВПД). Методика реализована на основе данных напряжений обмоток и на результатах измерений параметров ЭМВПД.

Ключевые слова: машина возвратно-поступательного действия, аппаратно-программный комплекс, бездатчиковый метод.

Благодарности: Работа, по результатам которой написана статья, выполнена в рамках Федеральной целевой программы по теме "Разработка экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 10–20 кВт для тяжелых условий эксплуатации", разработан и создан испытательный стенд для проведения исследований экспериментальных образцов электрической машины возвратно-поступательного действия.

SENSORLESS METHOD OF CONTROLLING THE POSITION OF THE MOVABLE ELEMENT OF THE ELECTRIC MACHINE OF THE RECIPROCATING ACTION OF

R.R. Gibadullin¹, A.N. Tsvetkov¹, I.V. Ivshin¹, L.V. Dolomanyuk¹

¹Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

torianin@mail.ru

Abstract: The article describes a Sensorless method for determining the position of the movable element electrical machines reciprocating action. The method is implemented on the basis of the data voltages of the windings and the results of measurements of parameters of electrical machines reciprocating action.

Keywords: reciprocating machine, hardware-software system, sensorless method.

Acknowledgments: The work, based on the results of which the article was carried out, was carried out within the framework of the Federal Target Program on the Development of an Experimental Specimen of a Reversible Electric Reciprocating Machine with a Power of 10-20 kW for Heavy Conditions of Operation, a test stand was designed and built for research of experimental samples Electric reciprocating machine.

В рамках Федеральной целевой программы по теме "Разработка экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия

мощностью 10–20 кВт для тяжелых условий эксплуатации" разработан и создан испытательный стенд (ИС) для проведения исследований экспериментальных образцов электрической машины возвратно-поступательного действия (ЭМВПД).

Большинство существующих линейных двигателей и генераторов оснащаются датчиками положения, которые позволяют определить только относительное расстояние. То есть подвижный элемент ПЭ электрической машины при запуске находится в каком-то определенном, изначально неизвестном положении, а датчик определяет перемещение подвижного элемента относительно первоначальной позиции. Такое решение не способствует осуществлению эффективного управления ЭМВПД. При этом применение дополнительных датчиков не только приводит к возрастанию затрат, но зачастую просто невозможно. К примеру, передовые разработчики линейных генераторов зачастую совмещают их с двигателями внутреннего сгорания, что позволяет достигать высоких частот колебаний ПЭ. А это, в свою очередь, влечет за собой повышение рабочих температур элементов машины. В таких условиях контактные датчики работать не смогут. Бесконтактные датчики (лазерный триангуляционный) необходимо наводить непосредственно на ПЭ, причем под определенным углом, что, естественно, при вышеуказанной конструкции невозможно. В этой связи разработка бездатчикового метода определения положения ПЭ такого рода машин является актуальной задачей [1].

Для решения данной задачи нами была разработана методика определения положения ПЭ машины в режиме генератора по данным напряжения обмоток.

В отличие от вращающихся электрических машин, форма сигнала напряжения ЭМВПД имеет сложный характер (рис. 1). Это связано с тем, что ПЭ то ускоряется, то замедляется. Соответственно меняются и амплитуда сигнала, и его период. Рассматривать такого рода сигнал как синусоидальный не представляется возможным [2].

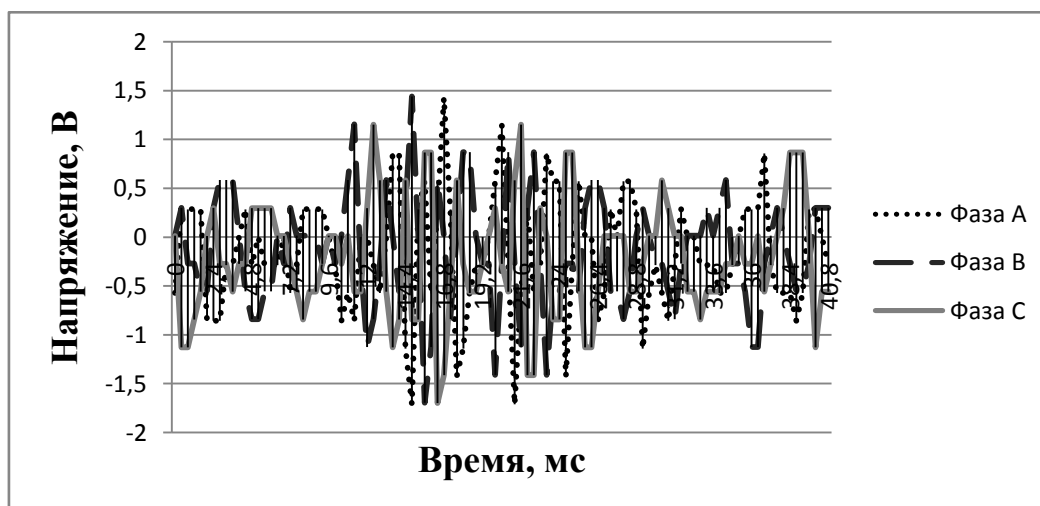


Рис. 1. Форма сигнала напряжения ЭМВПД

Напряжения, токи, потокосцепления электрических машин переменного тока можно представить как векторы в некоторой системе координат. Выбор системы координат влечет за собой изменение вида соотношений, которые описывают процессы, происходящие в машине [3].

Неподвижная трехфазная система координат имеет три оси, расположенные на плоскости под углом в 120 градусов, пересекающиеся в начале координат. Данная система позволяет отобразить процессы, происходящие в машине, на плоскость при представлении токов, напряжений и потокосцеплений в виде вращающихся векторов (рис. 2).

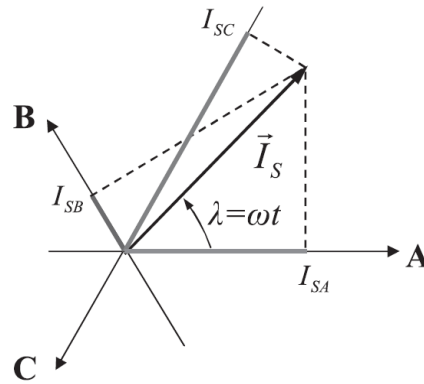


Рис. 2. Отображение обобщенного вектора тока в неподвижной трехфазной системе координат

Например, трехфазный ток в обмотках статора двигателя можно представить в виде вектора I_S , имеющего следующие свойства:

- амплитуда вектора равна амплитуде тока в фазе (I_S);
- начало вектора совпадает с началом координат;
- вектор вращается на плоскости вокруг начала координат с угловой скоростью ω .

На рисунке 2:

$$\begin{aligned} I_{SA} &= I_S \cos \lambda, \\ I_{SB} &= I_S \cos(\lambda - 120^\circ), \\ I_{SC} &= I_S \cos(\lambda - 240^\circ). \end{aligned} \quad (1)$$

Таким образом, три связанные скалярные величины фазных токов характеризуются в данной системе координат обобщенным вектором тока. Аналогично, в виде обобщенных векторов в данной системе координат могут быть представлены фазные напряжения и потокосцепления электрических машин.

Для определения угла λ необходимо перейти из неподвижной трехфазной системы координат на неподвижную Декартову систему координат. Система имеет две перпендикулярные оси α и β (рис. 3). Удобно выбирать оси так, чтобы одна из них совпадала с одной из трехфазных осей. Начало координат совпадает с началом координат описанной выше трехфазной системы.

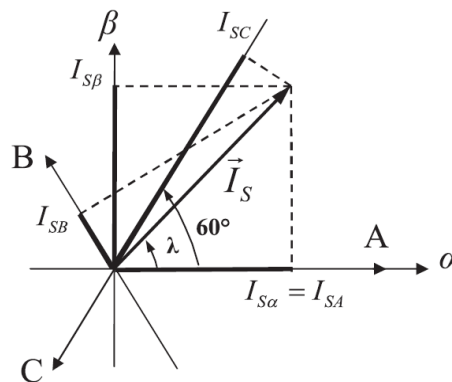


Рис. 3. Отображение обобщенного вектора тока в неподвижной Декартовой системе координат

Переход из трехфазной системы в Декартову (двухфазную) часто называют переходом от реальной трехфазной машины к абстрактной, обобщенной двухфазной [4].

Получим формулы перехода из трехфазной системы в Декартову. В зарубежной литературе этот переход называют преобразованием Кларка.

Воспользовавшись соотношениями прямоугольных треугольников, а также формулой для косинуса разности углов, запишем:

$$\begin{cases} -I_{SC} = I_S \cos(60^\circ - \lambda) = I_S \left(\frac{1}{2} \cos\lambda + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\lambda \right); \\ I_{SB} = I_S \cos(120^\circ - \lambda) = I_S \left(-\frac{1}{2} \cos\lambda + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\lambda \right). \end{cases} \quad (2)$$

Выразив из суммы этих уравнений I_S , получим:

$$I_S = \frac{I_{SB} - I_{SC}}{\sqrt{3} \sin\lambda}. \quad (3)$$

Кроме того, исходя из рис. 3

$$I_{S\beta} = I_S \sin\lambda. \quad (4)$$

Отсюда следует

$$I_{S\beta} = \frac{I_{SB} - I_{SC}}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

В итоге формулы преобразований координат при переходе из трехфазной системы в двухфазную выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} I_{S\alpha} = I_{SA}, \\ I_{S\beta} = \frac{I_{SB} - I_{SC}}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (6)$$

После определения проекций обобщенного вектора на оси α и β ($I_{S\alpha}$ и $I_{S\beta}$) можно определить угол λ между обобщенным вектором и осью α :

$$\lambda = \arctg \frac{I_{S\beta}}{I_{S\alpha}}. \quad (7)$$

При проведении данной операции стоит учесть то, что угол будет определяться в пределах 90° с соответствующим знаком в зависимости от четверти. Следовательно необходимо преобразовать полученное значение угла для I, II, III четвертей, если обобщенный вектор вращается по часовой стрелке; и для II, III, IV четвертей, если обобщенный вектор вращается против часовой стрелки [4].

Аппаратно-программный комплекс (АПК), применяемый на разработанном и созданном нами ИС, позволяет проводить измерения напряжений обмоток ЭМВПД. Полученные данные можно использовать как координаты обобщенного вектора, находящегося в неподвижной трехфазной системе координат. Далее по описанному способу определяется значение угла λ [5].

Для реализации вышеуказанного алгоритма определения угла λ была выбрана среда *Microsoft Excel*.

Приращение (уменьшение) угла λ соответствует изменению положения ПЭ, значение которого зависит от конкретного исполнения ЭМВПД.

Рассмотрим одну из точек рис. 1. В данной точке: $U_A = -1,425$; $U_B = 1,154$; $U_C = -0,275$. Указанные значения принимаем в качестве координат обобщенного вектора U_s ,

находящегося в неподвижной трехфазной системе координат. Для перехода на неподвижную Декартову систему координат воспользуемся соотношениями (6):

$$U_{S\alpha} = U_A = -1,425 \text{ В};$$

$$U_{S\beta} = \frac{U_{SB} - U_{SC}}{\sqrt{3}} = \frac{1,154 + 0,275}{\sqrt{3}} = 0,825 \text{ В},$$

где $U_{S\alpha}$ – координата обобщенного вектора U_S на оси α неподвижной Декартовой системы координат; $U_{S\beta}$ – координата обобщенного вектора U_S на оси β неподвижной Декартовой системы координат.

Далее по формуле (7) определяем угол λ :

$$\lambda = \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} = -\arctg \frac{0,825}{1,425} = -30,069^\circ.$$

Угол определен, но для того, чтобы измерительная система «понимала», на сколько сдвинулся обобщенный вектор, необходимо преобразовать полученное значение так, чтобы при достижении магнитом крайнего положения паза угол λ был равен 360 градусам. Для этого воспользуемся следующим алгоритмом:

- ЕСЛИ $U_{S\alpha} > 0$ И $U_{S\beta} > 0$, ТО:

$$\lambda = \left| \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} \right|; \quad (8)$$

- ЕСЛИ $U_{S\alpha} < 0$ И $U_{S\beta} > 0$, ТО:

$$\lambda = 180 - \left| \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} \right|; \quad (9)$$

- ЕСЛИ $U_{S\alpha} < 0$ И $U_{S\beta} < 0$, ТО:

$$\lambda = 180 + \left| \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} \right|; \quad (10)$$

- ЕСЛИ $U_{S\alpha} > 0$ И $U_{S\beta} < 0$, ТО:

$$\lambda = 360 - \left| \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} \right|. \quad (11)$$

Таким образом, для нашего случая ($U_{S\alpha} = -1,425$; $U_{S\beta} = 0,825$) необходимо воспользоваться формулой (9):

$$\lambda = 180 - \left| \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}} \right| = 180 - 30,069 = 149,931^\circ.$$

Следует отметить тот факт, что программная среда *Microsoft Excel* определяет углы в радианах. Поэтому сначала нужно найти значение угла λ в радианах, лишь затем перевести итоговое число в градусы [6].

Применение вышеописанного способа позволяет достаточно точно контролировать перемещение ПЭ, но не решает задачу определения его изначального положения. Мы предлагаем следующее решение.

Сигнал плавно меняющегося переменного напряжения, естественно, имеет точки экстремумов. Данные точки соответствуют положению ПЭ, при котором один из полюсов постоянных магнитов перекрывает конкретный паз статорных обмоток на максимальную площадь. Это означает, что при каждом прохождении пар полюсов постоянных магнитов под одним из пазов статорной обмотки возникает ЭДС, сигнал которого имеет две точки

экстремума (максимум и минимум), соответствующие определенным положениям ПЭ. Зная эту закономерность, можно с высокой точностью определить его положение в те моменты времени, когда сигналы напряжений достигают экстремумов. При этом следует учитывать индуктивность L и активное сопротивление R статорной обмотки ЭМВПД. В нашем случае $L = 15,154$ мГн, $R = 0,037$ Ом. Постоянная времени τ составит:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{1,154 \cdot 10^{-6}}{0,037} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

При частотах колебаний индуктора до 20 Гц постоянная времени практически не влияет на угол поворота λ .

Если работать при одной и той же частоте, этого было бы достаточно, но при повышении частоты колебаний ПЭ повышается и напряжение на обмотках. Возникает ситуация, когда в одном и том же положении ПЭ сигнал напряжения имеет абсолютно разные значения. В таких условиях невозможно понять, какой именно паз проходит ПЭ.

ПЭ ЭМВПД имеет две «мертвые» точки (определение которых необходимо для управления линейной машиной), отсюда следует, что он движется не с одинаковой скоростью, а то ускоряет, то замедляет свой ход. Причем максимальная скорость приходится на среднее положение. Соответственно, данная особенность влияет на частоту появления точек экстремумов (чем чаще появляются точки, тем ближе к середине ПЭ, и наоборот). Следовательно можно определить, к какому пазу относится данный экстремум независимо от величины напряжения в данной точке [7].

Кроме того, знание точного положения ПЭ в точках экстремумов сигнала напряжения дает возможность проверки корректности определения угла λ . Это возможно за счет свойств трехфазной системы.

Рассмотрим условный участок сигнала напряжения фазы A , который начинается с нуля, проходит два экстремума и снова достигает нулевой точки. При этом сигналы напряжения фаз B и C смещены на 120° и 240° соответственно (рис. 4).

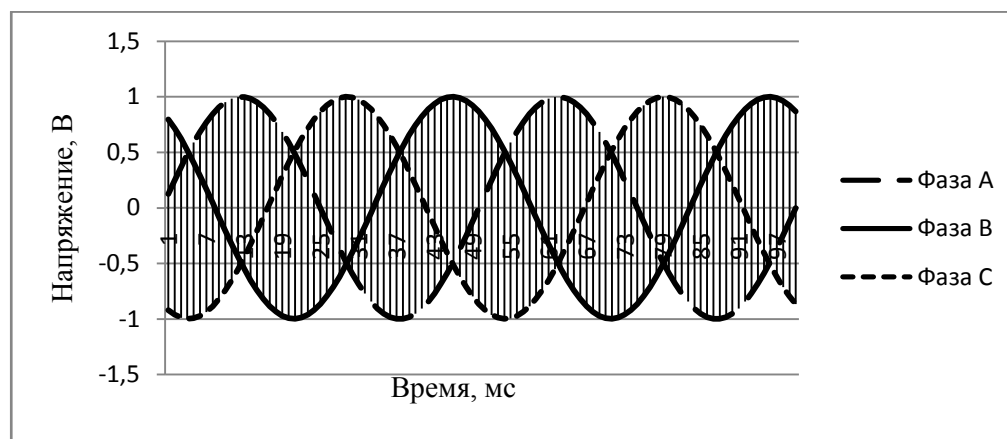


Рис. 4. Условный участок сигнала напряжения трехфазной системы

Исходя из предыдущих размышлений ясно, что указанный участок соответствует определенному перемещению ПЭ. Причем данное перемещение (или угол λ) можно уточнить, разделив отрезок на несколько частей:

- фаза A возрастает, фаза B убывает, фаза C убывает;
- фаза A возрастает, фаза B убывает, фаза C возрастает;
- фаза A убывает, фаза B убывает, фаза C возрастает;
- фаза A убывает, фаза B возрастает, фаза C возрастает;
- фаза A убывает, фаза B возрастает, фаза C убывает;

- фаза *A* возрастает, фаза *B* возрастает, фаза *C* убывает;
- фаза *A* возрастает, фаза *B* убывает, фаза *C* убывает (снова начальное условие).

Алгоритм программы сравнивает значения напряжения каждой фазы в текущей точке со значением в следующей точке, проверяет соответствие полученных данных одному из вышеуказанных условий (если функция возрастает, то 1, если нет, то 0). На основе данных вычислений составляется двоичный код. Далее числа переводятся из двоичной системы счисления в десятичную.

Для наглядности изобразим результат расчетов в графическом виде (рис. 5).

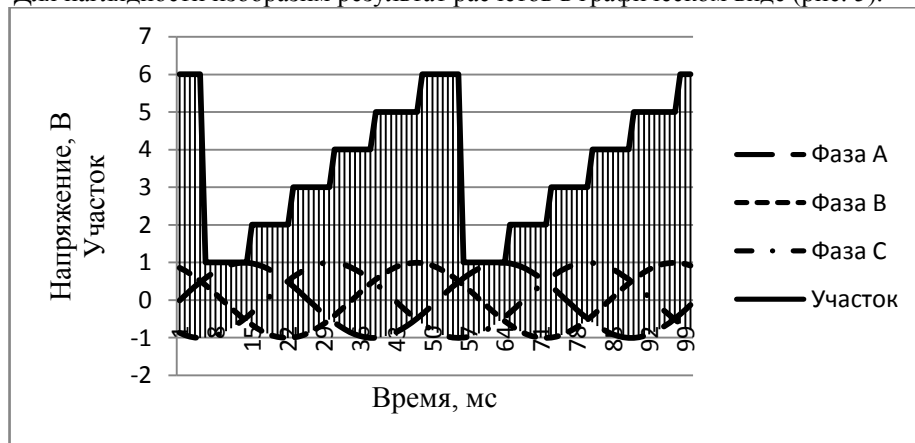


Рис. 5. Распределение сигнала напряжение по участкам

Из рис. 5 хорошо видно, что каждый участок начинается и заканчивается в точках экстремумов, положение которых, как уже описывалось ранее, можно вычислить. Таким образом, мы получили инструмент проверки правильности определения угла λ [8].

Зная начальную позицию и угол λ , можно определить непосредственно само положение ПЭ. Реализовано это следующим образом.

Как утверждалось ранее, при каждом прохождении пар полюсов постоянных магнитов под одним из пазов статорной обмотки возникает ЭДС, сигнал которого имеет две точки экстремумов (максимум и минимум). Следовательно, обобщенный вектор напряжения U_S совершает полный оборот в неподвижной трехфазной системе координат. Каждый оборот соответствует конкретному расстоянию, пройденному ПЭ ЭМВПД, зависящему от количества магнитов и пазов статорных обмоток и их ширины. Принцип определения положения состоит в том, что если определить количество полных оборотов указанного вектора до точки расположения ПЭ и приплюсовать к этому значению расстояние, пройденное ПЭ за текущий период (пропорционально обобщенному вектору U_S совершившему неполный оборот), можно вычислить общее пройденное расстояние [9].

Запишем универсальную формулу, позволяющую определить расстояние $d_{об}$ пройденное ПЭ за один оборот обобщенного вектора U_S :

$$d_{об} = (360 - \lambda) \cdot \left(\frac{l_{тр}}{K_{об}} \right) / 360 \text{ мм}, \quad (12)$$

где $l_{тр}$ – длина рабочего хода ПЭ; $K_{об}$ – количество оборотов обобщенного вектора U_S на полную длину $l_{тр}$ рабочего хода ПЭ. $K_{об}$ соответствует количеству оборотов вектора U_S до его смены направления вращения (при смене направления движения ПЭ, направление вращения обобщенного вектора тоже меняется). В нашем случае $K_{об} = 9$.

Далее переведем информацию о новом обороте вектора U_S в двоичный код следующим образом:

- ЕСЛИ значение угла λ в следующей точке больше, чем в текущей точке на 100, ТО 1; ЕСЛИ нет, ТО 0.

Программа суммирует количество единиц от точки начала отсчета до текущей. Таким образом, мы реализовали своеобразный счетчик оборотов обобщенного вектора. Теперь необходимо ввести ограничение на максимальное количество оборотов вектора U_S так, чтобы оно соответствовало длине рабочего хода ПЭ (соответствовало $K_{об}$):

- ЕСЛИ количество оборотов вектора U_S до текущей точки $> K_{об}$, ТО вычисляется остаток деления количества оборотов вектора U_S до текущей точки на $K_{об}$; ЕСЛИ нет, ТО количество оборотов вектора U_S до текущей точки.

Поскольку количество точек, при которых угол сбрасывается (точка начала нового оборота) на единицу меньше, чем $K_{об}$, то реализуем следующий алгоритм:

- ЕСЛИ результат предыдущего условия = 9, ТО 0; ЕСЛИ нет, ТО результат предыдущего условия.

Таким образом, мы реализовали счетчик оборотов вектора U_S , который автоматически определяет момент смены направления движения ПЭ.

Для определения текущего положения d ПЭ предлагается следующее условие:

- ЕСЛИ количество оборотов вектора U_S до текущей точки < 1 , ТО $d = d_{об}$; ЕСЛИ нет, ТО:

$$d = K_{от} \cdot \frac{l_{тр}}{K_{об}} + d_{об} \text{ мм}, \quad (13)$$

где $K_{от}$ – количество оборотов вектора U_S до текущей точки.

При применении вышеописанной методики точность определения положения зависит только от точности определения угла λ . К примеру, если точность определения угла составит 2° , то положение можно определить с точностью 0,074 мм (при $l_{мп} = 120$ мм). Для того, чтобы добиться такого результата, достаточно измерить напряжение на статорной обмотке 1620 раз за рабочий ход, что более чем достижимо на АПК, за счет применения высокоскоростного контроллера *NI CompactRIO 9066*.

Алгоритм определения положения был апробирован на ЭМВПД, разработанном учеными кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» под руководством доктора технических наук профессора Ившина И.В. [10].

Для примера определим положение ПЭ в одной из точек рис. 1 ($U_A = -0,570$; $U_B = 0,869$; $U_C = -0,560$). После применения вышеописанного способа определения угла λ можем записать: $U_{S\alpha} = -0,570$ В, $U_{S\beta} = 0,825$, $\lambda = 124,655^\circ$.

Определим расстояние $d_{об}$, пройденное ПЭ за один оборот обобщенного вектора U_S , согласно формуле (12)

$$d_{об} = (360 - \lambda) \cdot \left(\frac{l_{тр}}{K_{об}} \right) / 360 = (360 - 124,655) \cdot \left(\frac{120}{9} \right) / 360 = 8,714 \text{ мм}.$$

Затем программа определяет количество оборотов вектора U_S до текущей точки $K_{от}$, согласно предложенному ранее алгоритму.

Текущее положение d определяем по формуле (13)

$$d = K_{от} \cdot \frac{l_{тр}}{K_{об}} + d_{об} = 8 \cdot \frac{120}{9} + 8,714 \text{ мм}.$$

Для наглядности приведем график изменения положения ПЭ ЭМВПД (рис. 6) и график расхождения значений положений, определенных по датчику и по предложенной методике (рис. 7).

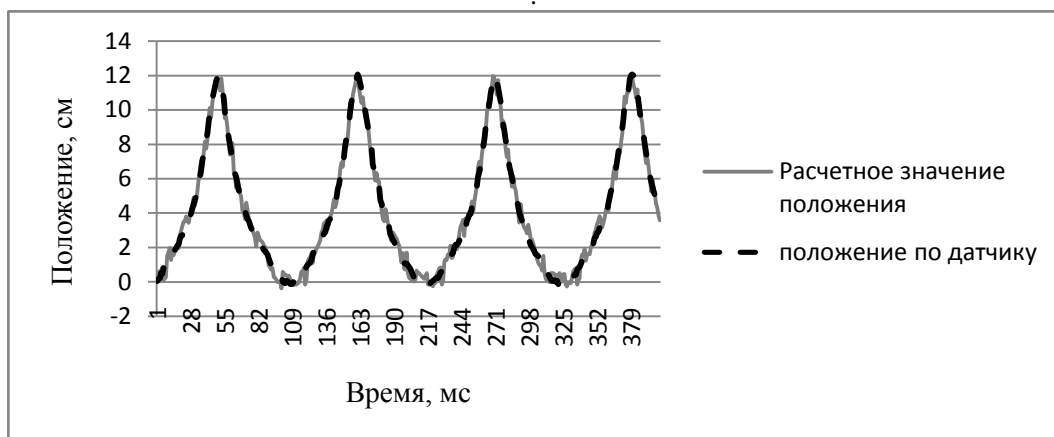


Рис. 6. График изменения положения ПЭ ЭМВПД

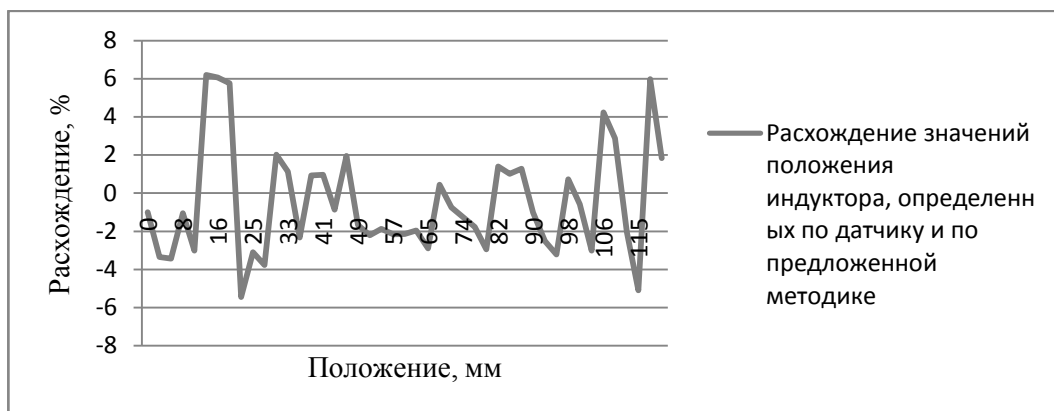


Рис. 7. Расхождение значений положений, определенных по датчику и по предложенной методике

Разработанный метод определения положения ПЭ ЭМВПД позволяет полностью отказаться от датчика положения. При этом отношение сигнал/шум составило 30,15 дБ, чувствительность 27° эл. на мм, коэффициент корреляции между значениями положения, рассчитанного по разработанной методике, и положения, определенного по данным датчика, составляет 0,994, что показывает достаточно высокую эффективность методики.

Литература

- Сергеенкова Е.В. Синхронная электрическая машина возвратно-поступательного движения (генератор): дис. ... канд. тех. наук: 05.09.01. М., 2011. 118 с.
- Цветков А.Н., Мисбахов Р.Ш., Денисова Н.В., Гибадуллин Р.Р. Разработка испытательного стенда для электрических машин возвратно-поступательного действия, работающих в тяжелых условиях // Сборник материалов I Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение»: теория и практика. Кемерово: 2014. С. 1–5.
- Цветков А.Н., Мисбахов Р.Ш., Низамиев М.Ф., Гибадуллин Р.Р. Схемные решения для разработки испытательного стенда для исследований обратимой машины возвратно-поступательного действия // Сборник материалов научно-технической конференции и выставки инновационных проектов, выполненных вузами и научными организациями Приволжского федерального округа. Нижний Новгород: 2014. С. 34–36.
- Макаров В.Г., Тамбов В.В. Обзор методов бездатчикового определения скорости асинхронных двигателей // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С.

34–38.

5. Andriollo, M., Dall’Ora, L., Martinelli, G., Tortella, A., “Performance comparison of saturated tubular linear permanent magnet generators by simplified FEAs”, ICRERA, 2012. P. 1-7.

6. Agustín García Santana, Dan El Montoya Andrade, Antonio de la Villa Jaen, “Output Power of Linear Generator under Reactive Control in Regular Waves”, ICREPQ, 2011. P. 392–397.

7. Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. СПб.: КОРОНА принт, 2004. 358 с.

8. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ, 2008. 319 с.

9. Гуляев И.В., Бобров М.А., Юшков И.С., Волков А.В., Попов А.А. Бездатчиковое управление синхронным двигателем с постоянными магнитами // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. №6. С. 119–122.

10. Цветков А.Н., Гибадуллин Р.Р., Копылов А.М., Долманюк Л.В. Стенд для испытания обратимых электрических машин возвратно-поступательного действия // Сборник материалов I Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». Казань. 2015. С. 109–111.

Авторы публикации

Гибадуллин Рамил Рифатович – аспирант 4 года обучения кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: torianin@mail.ru.

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ившин Игорь Владимирович – докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Долманюк Леонид Владимирович – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Sergeyenkova E.V. Sinkhronnaya elektricheskaya mashina vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya (generator) (Synchronous electric machine of reciprocating motion (generator)): dis. ... kand. tekh. nauk: 05.09.01. M., 2011. 118 s.

2. Tsvetkov A.N., Misbakhov R.SH., Denisova N.V., Gibadullin R.R. Razrabotka ispytatel'nogo stenda dlya elektricheskikh mashin vozvratno-postupatel'nogo deystviya, rabotayushchikh v tyazhelykh usloviyakh (Development of a test bench for electric reciprocating machines operating under severe conditions) // Sbornik materialov I Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Energetika i energosberezheniye»: teoriya i praktika. Kemerovo: 2014. S. 1–5.

3. Tsvetkov A.N., Misbakhov R.SH., Nizamiyev M.F., Gibadullin R.R. Skhemnyye resheniya dlya razrabotki ispytatel'nogo stenda dlya issledovaniy obratimoy mashiny vozvratno-postupatel'nogo deystviya (Scheme solutions for the development of a test bench for the study of a reversible reciprocating machine) // Sbornik materialov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii i vystavki innovatsionnykh proyektov, vypolnennykh vuzami i nauchnymi organizatsiyami Privolzhskogo federal'nogo okruga. Nizhniy Novgorod: 2014. S. 34–36.

4. Makarov V.G., Tambov V.V. Obzor metodov bezdatchikovogo opredeleniya skorosti asinkhronnykh dvigateley (A review of methods of sensorless determination of the speed of asynchronous motors) // Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal. 2014. №1. S. 34–38.

5. Andriollo, M., Dall'Ora, L., Martinelli, G., Tortella, A., “Performance comparison of saturated tubular linear permanent magnet generators by simplified FEAs”, ICRERA, 2012. p. 1–7.

6. Agustin Garcia Santana, Dan El Montoya Andrade, Antonio de la Villa Jaen, “Output Power of Linear Generator under Reactive Control in Regular Waves”, ICREPQ, 2011 p. 392–397.

7. Khiterer M.YA., Ovchinnikov I.Ye. Sinkhronnyye elektricheskiye mashiny vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya (Synchronous electric machines for reciprocating motion). SPb.: KORONA print, 2004. 358 s.

8. Vinogradov A.B. Vektornoye upravleniye elektroprivodami peremennogo toka (Vector control of AC electric drives). Ivanovo: IGEU, 2008. 319 s.

9. Gulyayev I.V., Bobrov M.A., Yushkov I.S., Volkov A.V., Popov A.A. Bezdatchikovoye upravleniye sinkhronnym dvigatelem s postoyannymi magnitami (Sensorless control of a synchronous motor with permanent magnets) // Nauchno-tekhnicheskyy vestnik Povolzh'ya. 2015. №6. S. 119–122.

10. Tsvetkov A.N., Gibadullin R.R., Kopylov A.M., Dolomanyuk L.V. Stend dlya ispytaniya obratimyykh elektricheskikh mashin vozvratno-postupatel'nogo deystviya (Stand for testing reversible electric machines of reciprocating action) // Sbornik materialov I Povolzhskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Priborostroyeniye i avtomatizirovannyy elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilichno-kommunal'nom khozyaystve». Kazan': 2015. S. 109–111.

Authors of the publication

Ramil Rifatovich Gibadullin – fourth-year PhD student of the Department of Industrial Power Supply (EPPS) Kazan State Power Engineering University (KGEU). E-mail: torianin@mail.ru.

Aleksey Nikolaevich Tsvetkov – PhD in Engineering, associate professor of the Department of Industrial Power Supply (EPPS) Kazan State Power Engineering University (KGEU).

Igor Vladimirovich Ivshyn – doctor of technical sciences, Professor, head of the Department of Industrial Power Supply (EPPS) Kazan State Power Engineering University (KGEU).

Leonid Vladimirovich Dolomanyuk – PhD in Pedagogic, associate professor of the Department of Industrial Power Supply (EPPS), Kazan State Power Engineering University (KGEU).

Поступила в редакцию

30 июня 2017 г.