

*ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ*

**Б.А. КОРОБЕЙНИКОВ, К.Ю. РОМАНЕНКО**

*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;  
электронная почта: romanenko\_life@mail.ru*

В статье рассматривается теория преобразователей с вращающимся магнитным полем. Предложен метод определения параметров преобразователя. Проведены исследования преобразователя с вращающимся магнитным полем в среде Matlab.

**Ключевые слова:** вращающееся магнитное поле, параметрическая идентификация, преобразователь с вращающимся магнитным полем, релейная защита.

Существующие микропроцессорные релейные защиты имеют недостатки, основными из которых являются: низкие помехоустойчивость, надежность и перегрузочная способность, повышенные требования к электромагнитной совместимости, высокая стоимость. Перечисленные недостатки вызывают необходимость в совершенствовании существующей релейной защиты.

Предлагается новая гибридная релейная защита, заключающаяся в использовании новых преобразователей с вращающимися магнитными полями (ПВМП), которые включаются между терминалом релейной защиты и измерительными трансформаторами тока и напряжения [1].

При этом ПВМП выполняют функции не только гальванического разделения цепей релейной защиты и трансформатора тока и напряжения, но и формирования информационных признаков сигналов для релейной защиты (РЗ).

В уже существующих микропроцессорных РЗ амплитудная составляющая тока определяется из уже существующих математических соотношений для определения амплитуды тока (1), программа которых заложена в микропроцессорной части.

$$i = I_m \sin \omega t ;$$

$$i' = I_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t ; \tag{1}$$

$$\frac{i}{\omega} = I_m \cos \omega t;$$

$$\left(\frac{i}{\omega}\right)^2 = I_m^2.$$

При использовании ПВМП микропроцессорная часть РЗ остается, и за счет многофазного выпрямления выделяется амплитуда тока  $I_m$ .

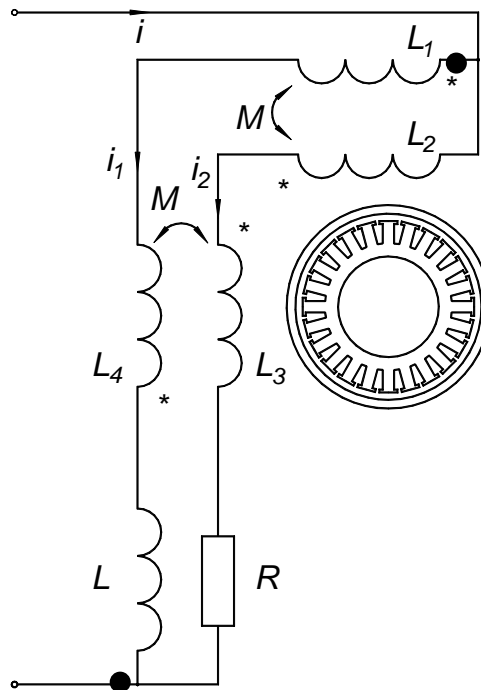


Рис. 1. Схема первичных цепей ПВМП с четырьмя обмотками

На рис. 1 представлена схема первичных цепей ПВМП с четырьмя обмотками. Обмотки ПВМП размещаются в пазах кольцевого магнитопровода. Проводники обмоток соединяются в секции, которые затем образуют катушки. Все катушки располагаются по окружности магнитопровода и образуют фазы обмоток.

При наличии двухфазной обмотки, которая состоит из двух сосредоточенных обмоток  $W_A$  и  $W_B$ , сдвинутых в пространстве на угол  $\theta$  и питаемых токами, которые сдвинуты друг относительно друга на угол  $\psi$ , можно получить эллиптическое вращающееся магнитное поле [2]. В этом случае результирующая МДС:

для прямого вращающегося поля находится по формуле:

$$F_{pr} = 0.5 \cdot \sqrt{F_{Am}^2 + F_{Bm}^2 + 2 \cdot F_{Am} \cdot F_{Bm} \cdot \cos(\theta - \psi)}; \quad (2)$$

для обратного вращающегося поля находится по формуле:

$$F_{obr} = 0.5 \cdot \sqrt{F_{Am}^2 + F_{Bm}^2 + 2 \cdot F_{Am} \cdot F_{Bm} \cdot \cos(\theta + \psi)}, \quad (3)$$

где  $F_{Am}$ ,  $F_{Bm}$  – МДС сосредоточенных обмоток  $W_A$  и  $W_B$ .

Для получения кругового вращающегося магнитного поля необходимо, чтобы МДС обратного вращающегося поля была равна нулю.

Выполнение указанного условия возможно, если выполняется условие

$$\begin{aligned} F_{Am} &= F_{Bm}, \\ \theta &= \frac{\pi}{2}, \quad \psi = \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Одним из примеров практической реализации условий (4) является включение в одну из двух обмоток однофазного асинхронного двигателя конденсатора. Однако необходимо использовать конденсатор большой емкости, что ухудшает массо-габаритные показатели и надежность устройства.

Предлагается новый подход для получения вращающегося магнитного поля на основе применения нескольких первичных обмоток.

В результате векторного суммирования МДС обмоток, при соответствующем их пространственном сдвиге, возможно получение кругового вращающегося магнитного поля при питании однофазным током или напряжением.

При обосновании работы ПВМП с несколькими первичными обмотками необходимы следующие допущения:

1. Магнитная проницаемость материала магнитопровода  $\mu = \infty$ .
2. Воздушный зазор в магнитопроводе равномерен по всей окружности магнитопровода.
3. Величина воздушного зазора мала по сравнению с радиусом магнитопровода и величиной полюсного деления.

4. Магнитная индукция синусоидальная, высшими пространственными гармониками пренебрегаем.

Пусть при синусоидальном токе МДС для двухфазной системы при круговом вращающемся магнитном поле находится по формуле:

$$F(t, x) = F_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \psi - x), \tag{5}$$

где  $\psi$  – угол сдвига МДС по фазе;

$x$  – положительная пространственная координата.

Тогда в комплексной форме МДС представлена формулой:

$$\dot{F}(t, x) = F_m \cdot e^{-j(\omega t - \psi - x)} = \dot{f} \cdot e^{-j(\omega t - x)}. \tag{6}$$

Пусть МДС каждой обмотки имеют соответствующие фазовые сдвиги, изображенные на рис. 2.

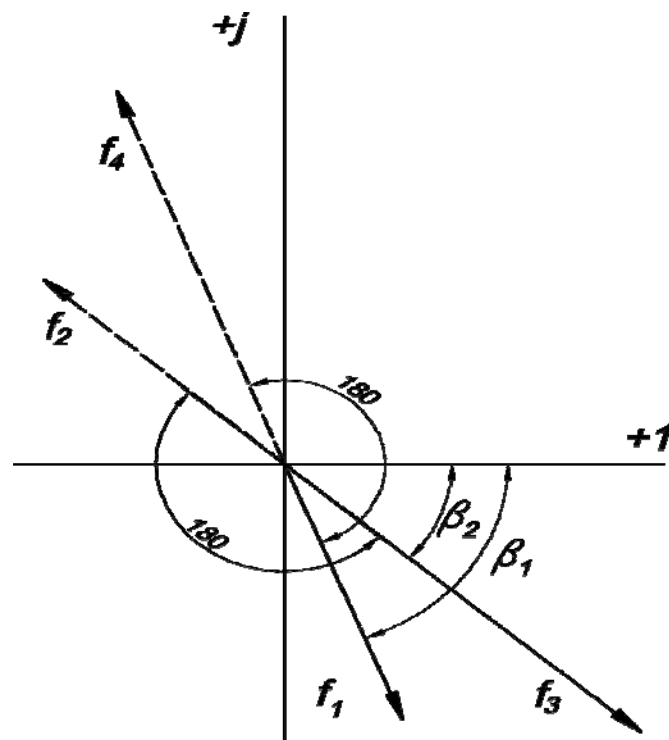


Рис. 2. Векторная диаграмма МДС схемы ПВМП

Тогда можно получить по формуле (7) следующие МДС обмоток:

$$\begin{aligned} \dot{f}_1 &= F_{mp} \cdot e^{-j\beta_1}, \\ \dot{f}_2 &= -p_2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \cdot F_{mp} \cdot e^{-j\beta_2}, \\ \dot{f}_3 &= p_1 \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \cdot F_{mp} \cdot e^{-j\beta_2}, \\ \dot{f}_4 &= -p_3 \cdot F_{mp} \cdot e^{-j\beta_1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $p_1 = \frac{w_3}{w_1}$ ,  $p_2 = \frac{w_2}{w_1}$ ,  $p_3 = \frac{w_4}{w_1}$ .

Тогда в комплексном виде относительные значения МДС каждой ветви находятся по формуле:

$$\begin{aligned} \dot{f}_1^* &= (1 - a \cdot p_2) + j \cdot p_2 \cdot b, \\ \dot{f}_2^* &= (a \cdot p_1 - p_3) - j \cdot p_1 \cdot b. \end{aligned} \quad (8)$$

Для получения вращающегося магнитного поля при соответствующем расположении обмоток необходимо, чтобы выполнялись условия равенства мнимой и действительной части.

Результирующая МДС вращающегося магнитного поля при синусоидальном токе в именованных единицах находится по формуле:

$$F(t, x) = \frac{|p_1 - p_2 \cdot p_3|}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2}} \cdot F_{mp} \cdot \sin(\omega \cdot t - \psi - x), \quad (9)$$

где  $\psi = \arg \dot{f}_1^* + \arg \dot{f}_2^*$ .

Таким образом, МДС первой гармоники ПВМП представляет собой волну, которая вращается вдоль зазора в сторону положительной пространственной координаты  $x$  со скоростью  $\omega$ .

Для получения вращающегося магнитного поля необходимо получить параметры обмоток ПВМП и величины балластных собственных и взаимных индуктивностей обмоток, а также их активные сопротивления.

Необходимо определить параметры на основе уравнений для электрических цепей и получить общие выражения для МДС в относительных

единицах. Для конкретного случая условия идентификации следующие:

$$\begin{aligned} a - p_1 &= p_1 \cdot b, \\ 1 - a \cdot p_1 &= b. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда

$$\begin{aligned} a &= \frac{2 \cdot p_1}{1 + p_1^2}, \\ b &= \frac{1 - p_1^2}{1 + p_1^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Если принять  $p_1 = 0.5$ , то  $a = 0.8$  и  $b = 0.6$ .

Для определения других параметров ПВМП необходимо составить целевую функцию (12):

$$Q = e_1^2(q, p_2) + e_2^2(q, p_2) \rightarrow \min, \quad (12)$$

при ограничениях на параметры:

$$\begin{aligned} m_1 &< q < n_1, \\ m_2 &< p_2 < n_2. \end{aligned}$$

При этом ошибки находятся по формуле (13):

$$\begin{aligned} e_1(q, p_2) &= 0.8 - a(q, p_2), \\ e_2(q, p_2) &= 0.6 - b(q, p_2). \end{aligned} \quad (13)$$

Минимизация целевой функции производилась методом квази-Ньютона.

Для решения поставленной задачи необходимо задаться сечением проводов обмоток и числом витков базисной обмотки, в результате чего определяется величина коэффициента  $k$ .

Зная величину и число витков базисной индуктивности, легко определить параметры ПВМП в именованных единицах.

Для формирования информационных признаков сигналов целесообразно

использовать на выходе ПВМП многофазные выпрямители. Один из вариантов подключения такого выпрямителя приведен на рис. 3.

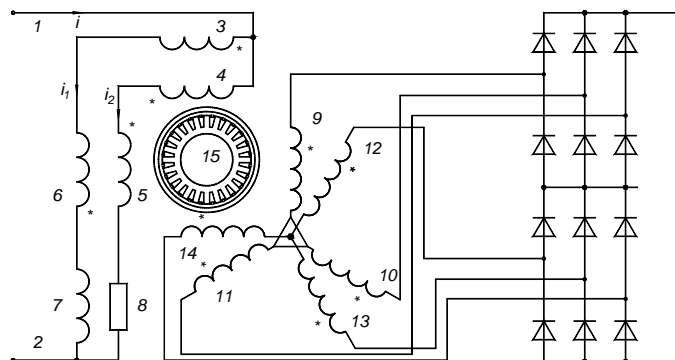
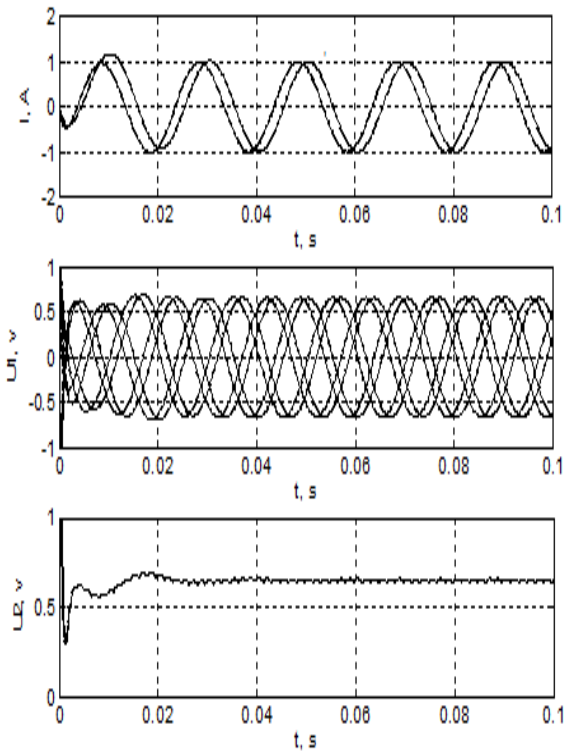
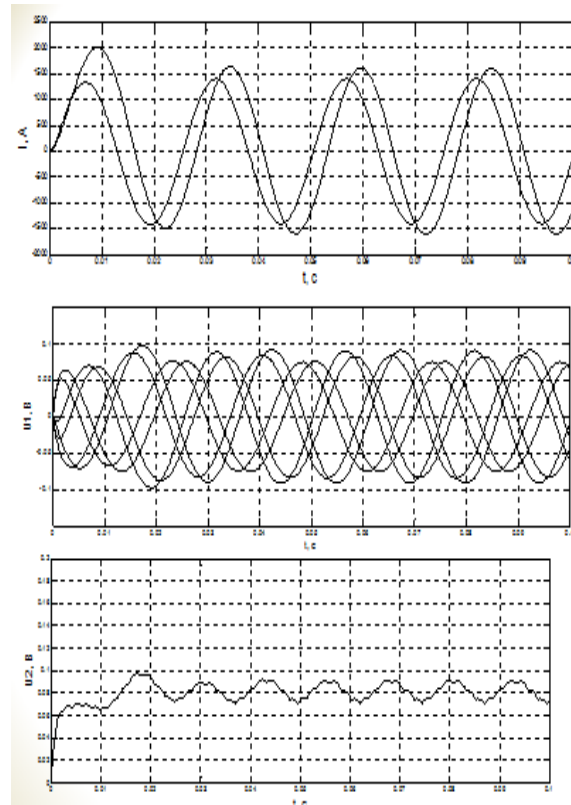


Рис. 3. Схема ПВМП с многофазным выпрямителем

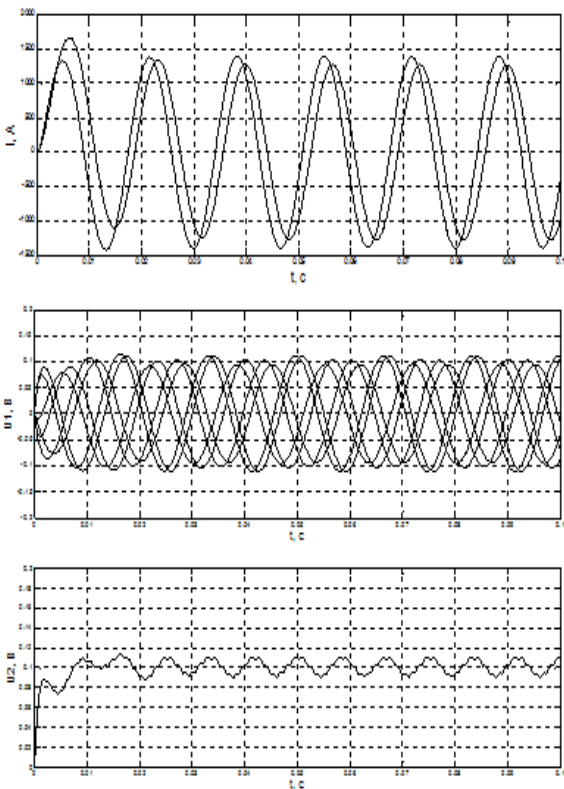
На рис. 4 приведены осциллограммы основных электрических величин ПВМП, полученные на математической модели в среде Matlab. Из осциллограммы видно, что при синусоидальном входном токе при частоте 50 Гц (рис. 4, а) пульсации выходного выпрямленного напряжения относительно небольшие и происходит формирование информационного признака сигнала – амплитуды тока. Из осциллограмм (рис. 4, б, в) видно, что при синусоидальном входном токе при частоте 40 Гц и 60 Гц соответственно пульсации выходного выпрямленного напряжения становятся больше, чем при частоте 50 Гц. Аналогичная картина наблюдается и на рис. 4, г, где пульсации выходного выпрямленного напряжения становятся большими.



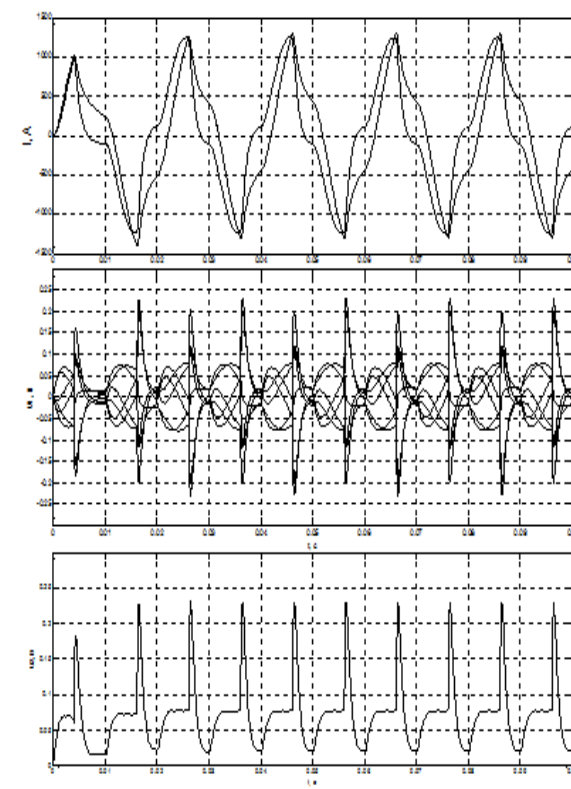
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Осциллограмма электрических величин ПВМП при:  
 а) синусоидальном режиме и частоте тока  $f = 50$  Гц;



б) синусоидальном режиме и частоте тока  $f = 40$  Гц;

в) синусоидальном режиме и частоте тока  $f = 60$  Гц;

г) установившемся режиме при перегрузке ТТ (при чисто активной нагрузке);  $I$  – токи в первичных обмотках ПВМП,  $U_1$  – напряжение на вторичных обмотках ПВМП,  $U_2$  – напряжение на выходе выпрямителя.

Анализ этих осциллограмм свидетельствует, что для уменьшения пульсаций достаточно установить сглаживающий контур.

Очевидно, что полученный информационный признак сигнала – амплитуда тока, может быть использован при его подаче в микропроцессорный терминал для осуществления более простой токовой релейной защиты электрических сетей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Коробейников Б.А., Ищенко А.И., Сидоров Д.И., Радионов В.М.**

Расчет параметров однофазного трансформатора с вращающимся магнитным полем // Электротехнические комплексы и системы. Краснодар: КубГТУ, 2009. С. 8–11.

2. **Иванов-Смоленский А.** Электрические машины. 3-е изд., Т. 2. М.: МЭИ, 2006. 652 с.

#### REFERENCES

1. Korobeynikov B.A., Ishchenko A.I., Sidorov D.I., Radionov V.M., *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy* (Electrotechnical complexes and systems), Krasnodar, 2009, pp. 8–11.

2. Ivanov-Smolenskiy A., *Elektricheskie mashiny* (Electric machines), Vol. 2, Moscow, 2006, 652 p.

*Поступила 24.04.14 г.*

#### *STUDY OF THE MODES OF CONVERTER WITH A ROTATING MAGNETIC FIELD FOR RELAY PROTECTION OF POWER NETWORKS*

**B.A. KOROBAYNIKOV, K.YU. ROMANENKO**

*Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072; e-mail: romanenko\_life@mail.ru*

The article considers the theory of converter with a rotating magnetic field. The method of determination of parameters of the converter. Studies of the converter with a rotating magnetic field in the Matlab environment.

**Key words:** rotating magnetic field, parametric identification, converter with a rotating magnetic field, relay protection.