

УДК 621.314

СПОСОБ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ  
 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО  
 РЕЖИМА РАБОТЫ МНОГОФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ  
 METHOD FOR VECTOR CONTROL OF A SEMICONDUCTOR CONVERTER  
 FOR PROVIDING A POLYHARMONIC OPERATING MODE  
 OF A MULTI-PHASE ELECTRIC MACHINE

Пантелеев С.В., Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент  
 Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь,  
 Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент,  
 Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
 S. Panteleev, A. Malashin, Cand. tech. Sciences, Associate Professor,  
 Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus  
 S. Sizikov, Candidate of Technical Sciences  
 Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация. На основе проведенного анализа электромагнитных процессов в многофазном полупроводниковом преобразователе электрической энергии создана его дискретная математическая модель, которая учитывает перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим в зависимости от числа фаз. С использованием данной математической модели и схемы инжекции высших гармоник тока, которая обеспечивает полигармонический режим работы полупроводникового преобразователя, разработан способ независимого управления пространственными гармоническими составляющими входного тока преобразователя.*

*Abstract. Based on the analysis of electromagnetic processes in a multiphase semiconductor converter of electrical energy, its discrete mathematical model was created, which takes into account the redistribution of electromagnetic energy by individual spatial harmonic components, depending on the number of phases. Using this mathematical model and the scheme of injection of higher current harmonics, which provides a polyharmonic mode of operation of a semiconductor converter, a method for independent control of the spatial harmonic components of the input current of the converter has been developed.*

*Ключевые слова:* векторное, управление, полупроводниковый, полигармонический режим, инжекция гармоник.

*Key words:* vector, control, semiconductor, polyharmonic mode, harmonic injection.

## ВВЕДЕНИЕ

Возможность работы многофазной электрической машины в полигармоническом режиме является одним из преимуществ перед трехфазной электрической машиной. Обеспечение функционирования электрической машины в

полигармоническом режиме работы позволит улучшить ее массогабаритные и энергетические показатели. При этом для получения максимальной активной мощности электрической машины необходимо решить задачу согласования во временной области полигармонической ЭДС и тока.

Особенности совместного функционирования многофазной электрической машины и полупроводникового преобразователя электрической энергии (ППЭЭ) обуславливают особый подход к синтезу системы управления.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Разработана система векторного управления током в цепи многофазной электрической машины. Для этого на основе проведенного анализа электромагнитных процессов в многофазном ППЭЭ создана его дискретная математическая модель, которая учитывает перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим в зависимости от числа фаз [1].

$$\bar{U}_{h_i} = \bar{U}_{ss,h} + R\bar{I}_{h_i} + L_h \frac{d\bar{I}_{h_i}}{dt}; \quad (1)$$

$$\bar{U}_{ss,h} = \bar{\Phi}_{ih} u_d; \quad (2)$$

$$\bar{\Phi}_{ih} = \frac{1}{2} T^{-1} M T \bar{S}_{ih}; \quad (3)$$

$$i_d = \frac{m}{2} \sum_{h=1}^{(m-1)/2} \bar{\Phi}_{ih} \bar{I}_{h_i}; \quad (4)$$

$$i_d = i_f + i_l. \quad (5)$$

$$i_f = C_d \frac{du_d}{dt} \quad (6)$$

где  $\bar{U}_{h_i}, \bar{I}_{h_i}, \bar{U}_{ss,h}$  – векторы-столбцы мгновенных значений сетевых напряжений и токов, а также напряжений на силовом входе ПК в двухмерных ортогональных неподвижных системах координат  $\alpha_h, \beta_h$ ,  $R$  и  $L_h$  – матрицы (размерностью  $m \times m$ ) активных сопротивлений и индуктивности буферных реакторов;

$\bar{\Phi}_{ih} = [\varphi_{\alpha_h} \quad \varphi_{\beta_h}]^T$  – дискретные коммутационные вектор-функции;

$u_d$  – выходное напряжение ППЭЭ;

$T^{-1}$  – матрица преобразования координат;

$M$  – матричная константа размерностью  $m \times m$ ;

$\bar{S}_{ih}$  – комбинация состояний ключей ПК;

$i_d$  – выходной ток ППЭЭ;  $m$  – число фаз;

$i_f$  – ток в цепи емкостного фильтра  $C_d$ ;

$i_l$  – ток нагрузки ППЭЭ;

$i = 0 \dots (N-1)$  – номер комбинации состояний ключей ПК;

$N$  – общее число допустимых комбинаций состояний ключей ПК.

С использованием данной математической модели и схемы инъекции высших гармоник тока, которая обеспечивает полигармонический режим работы ППЭЭ,

разработан способ независимого управления пространственными гармоническими составляющими входного тока преобразователя.

Функциональная схема регулирования ППЭЭ представлена на рисунке 1 и выполнена на основе принципов подчиненного регулирования и векторного управления вектором входного тока  $\bar{i}_h$  ППЭЭ.

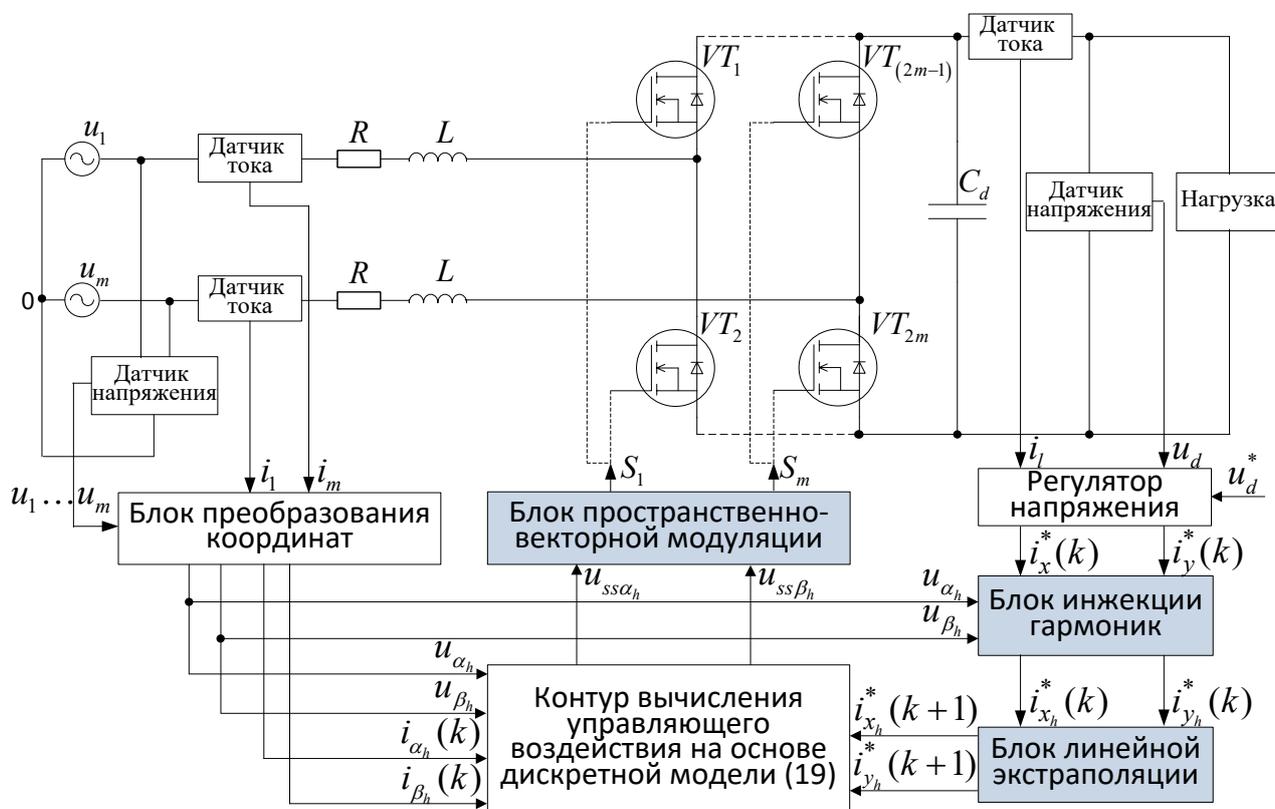


Рисунок 1 – Функциональная схема регулирования ППЭЭ

В разработанной системе управления для обеспечения полигармонического режима работы полупроводникового преобразователя электрической энергии разработана схема инъекции высших гармоник тока (7)–(9).

Заданные значения «активных» составляющих  $h$ -го вектора входного тока  $i_{x_h}^*(k)$  при  $h > 1$  определяются на основе «активной» составляющей вектора входного тока при  $h = 1$  с использованием весовых коэффициентов  $C_h$

$$i_{x_h}^*(k) = C_h i_{x_1}^*(k). \quad (7)$$

Весовые коэффициенты  $C_h$  рассчитываются на основе значений модулей векторов входного напряжения ППЭЭ  $U_h(k)$  согласно выражению

$$C_h = U_h(k)/U_1(k). \quad (8)$$

При этом заданное значение «активной» составляющей тока  $i_{x_1}^*(k)$  определяется как функция полученного регулятором напряжения постоянного тока заданного значения «активной» составляющей тока  $i_x^*(k)$ :

$$i_{x_1}^*(k) = i_x^*(k) / \sum_{h=1}^{(m-1)/2} C_h. \quad (9)$$

Основой разработанной системы векторного управления ППЭЭ является его дискретная математическая модель изменения мгновенных значений входного тока (1). На ее основе в начале каждого периода управления определяется управляющее воздействие в виде векторов напряжения полупроводникового преобразователя электрической энергии, позволяющих компенсировать отклонение вектора входного тока ППЭЭ в конце периода управления.

Формирование в каждой из фаз полигармонических токов, сопряженных по форме и фазе с питающим преобразователь напряжением, осуществляется посредством управляющих воздействий в виде векторов напряжения полупроводникового коммутатора, реализация которых осуществляется методом многофазной пространственно-векторной модуляции [2].

Для проверки разработанных положений создана имитационная модель девятифазного ППЭЭ с системой векторного управления.

Осциллограммы выходного тока и напряжения на рисунке 2 иллюстрируют включение преобразователя с нагрузкой  $P_a = 200$  кВт.

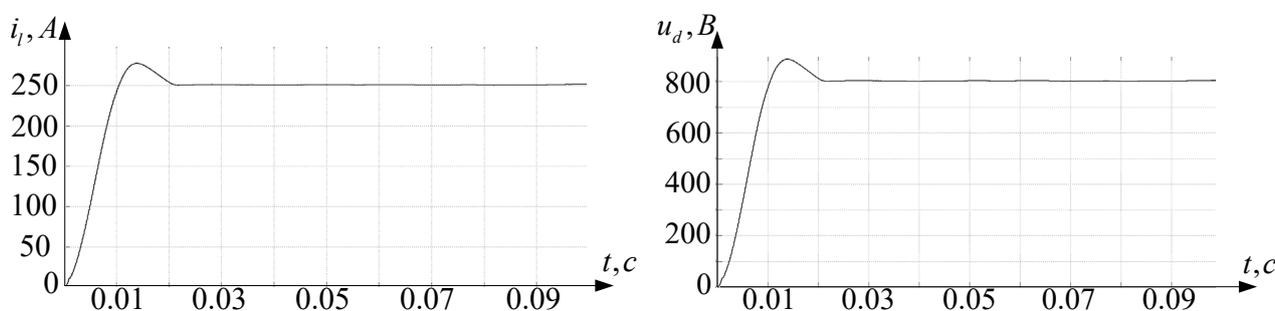


Рисунок 2 – Осциллограммы тока и напряжения на выходе полупроводникового преобразователя электрической энергии

На рисунке 3 приведены осциллограммы входного фазного напряжения и тока ППЭЭ при заданной нагрузке, а также осциллограмма фазного напряжения, которое формируется полупроводниковым коммутатором посредством разработанного алгоритма пространственно-векторной модуляции.

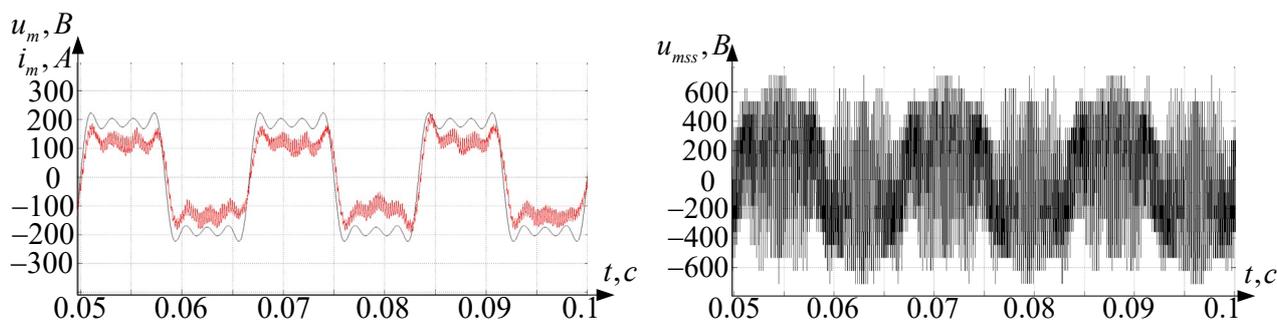


Рисунок 3 – Осциллограммы сигналов полупроводникового преобразователя электрической энергии в звене переменного тока

Из рисунка 3 видно, что разработанный способ векторного управления многофазным ППЭЭ учитывает перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим, что позволяет обеспечить в каждой из фаз системы полигармонический ток, который по форме и фазе сопряжен с питающим напряжением. Фазные напряжения полупроводникового коммутатора представлены 17-уровневой формой сигнала  $(0, \pm u_d / 9, \pm 2u_d / 9, \dots, \pm 8u_d / 9)$ .

На рисунке 4 приведены траектории движения пространственных векторов входного тока ППЭЭ  $\vec{I}_h$  в соответствующих  $\alpha_h \beta_h$  системах координат.

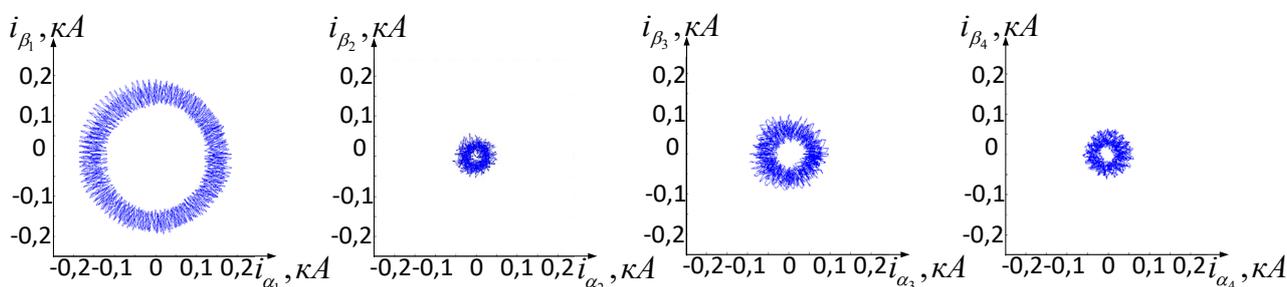


Рисунок 4 – Траектории движения пространственных векторов входного тока полупроводникового преобразователя электрической энергии в соответствующих  $\alpha_h \beta_h$  системах координат

Из рисунка 4 видно, что разработанный способ векторного управления многофазным ППЭЭ позволяет обеспечить независимое управление пространственными гармоническими составляющими входного тока преобразователя в различных  $\alpha_h \beta_h$ -плоскостях.

Исследование системы векторного управления на имитационной модели выявило достаточную устойчивость ППЭЭ к действию основных дестабилизирующих факторов и параметрических возмущений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты математического моделирования показывают, что разработанный способ векторного управления позволяет решить задачу независимого управления

пространственными гармоническими составляющими тока в рабочей обмотке электрической машины и тем самым устранить основные недостатки применения электрических машин с полигармонической ЭДС в системах электроснабжения.

Следовательно, разработанная система управления многофазным полупроводниковым преобразователем электрической энергии позволит реализовать управление током в цепи электрической машины таким образом, чтобы обеспечить формирование в каждой из фаз полигармонических токов, согласованных по форме и фазе с ЭДС холостого хода электрической машины, что позволит уменьшить удельную массу системы электроснабжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеев С.В. Разработка математической модели многофазного полупроводникового преобразователя электрической энергии с системой векторного управления. Часть 1 / С.В. Пантелеев, А.Н. Малашин // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель. – 2020 – № 2. – С. 82-90.

2. Пантелеев, С.В. Моделирование  $m$ -фазного активного выпрямителя напряжения с пространственно-векторной модуляцией / С.В. Пантелеев, А.Н. Малашин, А.Е. Каледа // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 455–468. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-455-468>