

## Управление многофазным двигателем на постоянных магнитах при несинусоидальных ЭДС и питании от АИН

**А. Г. Воронцов**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия  
ag.voroncov@gmail.com

**Аннотация.** Многие электроприводы выполняются с использованием многофазных двигателей на постоянных магнитах (ДПМ) и транзисторных инверторов напряжения (АИН). В зависимости от варианта размещения магнитов на роторе и от выполнения обмоток статора ДПМ искажения ЭДС фаз могут быть более или менее значительны. Искажения токов фаз зависят от ЭДС, от особенностей АИН, а также от алгоритма управления привода. По методологии моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам построена математическая модель многофазного ДПМ с учетом несинусоидальности ЭДС. Построены компьютерные модели приводов с многофазным ДПМ, несколькими АИН и системами управления (СУ). Выполнено сравнение алгоритмов векторного управления в осях  $dq$  и в осях фаз в приводе с многофазным ДПМ с несинусоидальными ЭДС и несколькими АИН. Системы векторного управления в осях фаз ДПМ обеспечивают лучшую форму токов фаз и меньшие пульсации электромагнитного момента ДПМ.

**Ключевые слова:** двигатель на постоянных магнитах, многофазный двигатель, несинусоидальность ЭДС, автономный инвертор напряжения, векторное управление, моделирование

**Для цитирования:** Воронцов А. Г. Управление многофазным двигателем на постоянных магнитах при несинусоидальных ЭДС и питании от АИН // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 7. С. 91–99. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-91-99.

Original article

## Control of a Polyphase Motor with Permanent Magnets with Non-Sinusoidal EMF and Power Supply from VSI

**A. G. Vorontsov**

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia  
ag.voroncov@gmail.com

**Abstract.** Many electric drives are made using permanent magnet multiphase motors (PMSM) and transistor voltage inverters (VSI). Depending on the placement of the magnets on the rotor and on the performance of the stator windings of the PMSM, the distortion of the EMF of the phases can be more or less significant. Phase current distortions depend on the EMF, as well as on the features of the VSI, on the drive control algorithm. According to the methodology of modeling systems for interconnected subsystems, a mathematical model of a multi-phase PMSM was built taking into account the non-sinusoidality of the EMF. Computer models of drives with multi-phase PMSM, several VSI and control systems (CS) are built. A comparison of vector control algorithms in the  $dq$  axes and in the phase axes in the drive with a multi-phase PMSM with non-sinusoidal EMF and several VSI is made. Vector control systems in the axes of the phases of the PMSM provide a better shape of the phase currents and less ripple of the electromagnetic torque of the PMSM.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor, polyphase motor, non-sinusoidal EMF, VSI, vector control, simulation

**For citation:** Vorontsov A. G. Control of a Polyphase Motor with Permanent Magnets with Non-Sinusoidal EMF and Power Supply from VSI // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 91–99. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-91-99.

В системах электродвижения (СЭД) судов и кораблей, в ветроэлектрических установках (ВЭУ), в тяговых электроприводах и в других системах применяются синхронные двигатели с постоянными магнитами (ДПМ). Эти машины не имеют контактных колец и их обслуживание менее трудоемко. Ротор не содержит обмотки и потери энергии в нем минимальны, что упрощает систему охлаждения. Для ДПМ не требуется возбуждатель. Машина имеет преимущество по КПД в сравнении с другими машинами.

Вместе с тем, напряжение ДПМ зависит от тока статора, от фазы вектора тока относительно вектора ЭДС, от частоты вращения ротора, и во многих случаях регулирование напряжения составляет проблему.

Другая сложность применения ДПМ возникает в мощных низковольтных частотно-регулируемых приводах при низких частотах вращения ротора. Если машина трехфазная, с большим диаметром ротора, то на полюс и фазу обычно приходится значительное количество пазов статора. Обмотка выполняется распределенной, с сокращением шага, со скосом пазов, с другими мерами, обеспечивающими синусоидальность ЭДС. Но при большой мощности и низком напряжении ДПМ необходимо распределять мощность и токи по нескольким трехфазным обмоткам и нескольким источникам питания. При этом ДПМ выполняется многофазным, и в нем сложнее обеспечить синусоидальность ЭДС в статоре. Во многих случаях обмотки выполняются сосредоточенными,

без сокращения шага, без скоса пазов. При этом ЭДС могут быть существенно искажены в зависимости от варианта размещения магнитов на роторе и других особенностей ДПМ. Типичные решения по размещению магнитов на роторе ДПМ представлены на рис. 1. На этом же рисунке изображены кривые линейных ЭДС машин различного назначения – кривые *а–с*.

Форма ЭДС ДПМ определяется также конструкцией магнитопровода статора и особенностями исполнения обмоток – количеством и формой зубцов и пазов, скосом пазов, сокращением шага обмоток, соединением фаз. Например, в ЭДС на рис. 1, *б* видны зубцовые пульсации, что свидетельствует о выполнении магнитопровода без скоса пазов. В ЭДС на рис. 1, *в* зубцовых пульсаций нет, что свидетельствует о наличии скоса пазов.

Несинусоидальность ЭДС многофазных ДПМ может существенно повлиять на форму токов фаз, на работу источников питания, например автономных инверторов напряжения (АИН), на характеристики электропривода. Очевидно также, что системы управления приводами должны строиться с учетом искажений напряжений и токов. Указанные особенности приводов должны учитываться при построении математических и компьютерных моделей систем и при расчетах процессов различного рода.

В некоторых комплексах моделей электрических систем несинусоидальность ЭДС в ДПМ учитывается, например в MatLab [1], [2], в SimInTech [3]. Однако учет формы ЭДС выполня-

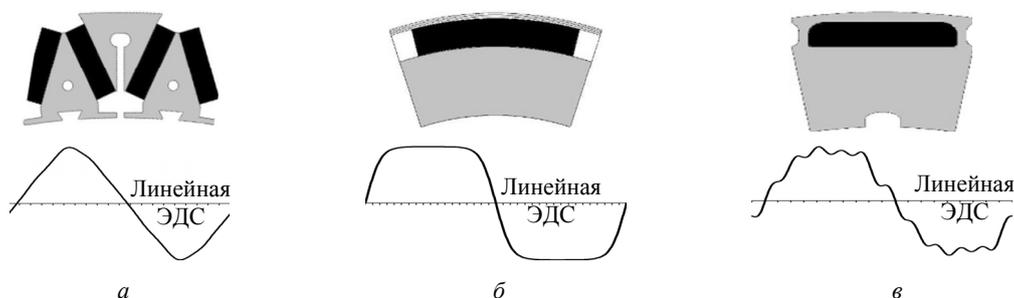


Рис. 1. Фрагменты конструкций ротора и линейные ЭДС статора ДПМ:

- а* – тихоходный двигатель большой мощности;
- б* – высокооборотный двигатель с неферромагнитным бандажем;
- в* – тяговый двигатель для двухзонного управления (под нагрузкой)

Fig. 1. Fragments of rotor structures and line stator EMF of PMSM:

- a* – low-speed high power motor; *б* – high-speed motor with non-ferromagnetic belt;
- в* – traction motor for dual zone control

ется недостаточно корректно – рассматривается только трапецеидальная форма ЭДС, обусловленная одной определенной конструкцией ротора. Не учитывается влияние на форму ЭДС других особенностей конструкции машины.

В данной статье предложен более общий подход к математическому описанию многофазных ДПМ с несинусоидальными ЭДС, позволяющий повысить точность анализа процессов. При этом рассматривается влияние несинусоидальности ЭДС на электромагнитные процессы в системах, на выбор алгоритмов регулирования процессов.

**Математическая модель многофазного ДПМ с несинусоидальными ЭДС.** В исследовании используется методология моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам, представленная в ряде публикаций [4]–[5]. За основу описания машины принята модель многофазной синхронной машины, разработанная М. В. Прониным [4]. В соответствии с методологией математическое описание многофазного ДПМ с несинусоидальными ЭДС осуществляется при представлении его в виде подсхем, изображенных на рис. 2, которые связаны друг с другом зависимыми источниками напряжения и тока.

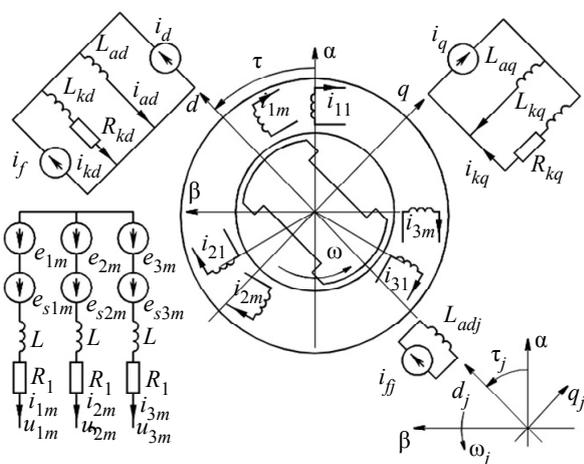


Рис. 2. Подсхемы ДПМ  
Fig. 2. PMSM subcircuits

Обмотки статора описаны в осях фаз (номер фазы  $n = 1, 2, 3$ , номер обмотки  $m = 1, \dots, M$ ,  $u_{nm}$  – напряжения фаз,  $i_{nm}$  – токи фаз). В подсхемах статора в качестве зависимых источников учтены ЭДС фаз  $e_{nm}$  (обусловленные потоком в зазоре), а также ЭДС взаимной индукции фаз по путям рассеяния  $e_{snm}$ . Учтены индуктивности фаз  $L$  и активные сопротивления  $R_1$ . ЭДС  $e_{snm}$  и индуктивность  $L$  определяются при использовании

индуктивности рассеяния фаз  $L_{sM}$  в симметричном режиме работы всех обмоток, индуктивности рассеяния фаз  $L_{s1}$  в симметричном режиме работы одной обмотки. По основным гармоникам магнитного поля контуры ротора описаны в осях  $dq$ .

В подсхемах ротора в качестве зависимых источников учтены токи реакции якоря  $i_d$  и  $i_q$ , индуктивности намагничивания  $L_{ad}$  и  $L_{aq}$ , рассеяния  $L_{kd}$ ,  $L_{kq}$  и активные сопротивления  $R_{kd}$ ,  $R_{kq}$  демпферов, источником тока  $i_f$  учтено возбуждение магнитами. На рис. 2 указаны направления токов и напряжений, вращающихся осей  $d$  и  $q$ , неподвижных  $\alpha$  и  $\beta$ , направление вращения ротора с частотой  $\omega$ , угол поворота  $\tau$  оси  $d$  ротора. В координатах высших гармоник указаны направления осей  $d_j$  и  $q_j$  и частоты вращения  $\omega_j$ .

В модели ДПМ используются индуктивности

$$L = 2L_{s1} - L_{sM}, L_a = M(L_{sM} - L_{s1}).$$

В системе уравнений используются коэффициенты

$$\begin{cases} c_{nm} = \cos\left[\frac{2\pi}{3}\left(n-1 + \frac{m-1}{2M}\right)\right]; \\ s_{nm} = \sin\left[\frac{2\pi}{3}\left(n-1 + \frac{m-1}{2M}\right)\right]; \\ c_m = \cos\left[\frac{\pi}{M}(m-1)\right]; \\ s_m = \sin\left[\frac{\pi}{M}(m-1)\right]. \end{cases}$$

Уравнения подсхем статорных обмоток

$$\frac{di_{nm}}{dt} = \frac{1}{L + L_{st}} \times \left( e_{nm} + e_{snm} - u_{nm} - R_1 i_{nm} + L_{st} \frac{di_{nm}}{dt} \right),$$

где  $L_{st}$  – индуктивность, используемая для стабилизации вычислительных процессов [4].

Взаимное влияние фаз по путям рассеяния и токи реакции якоря определяются при использовании следующих переменных:

$$\begin{aligned} \frac{di_{\alpha}}{dt} &= \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 c_{nm} \frac{di_{nm}}{dt}; \\ \frac{di_{\beta}}{dt} &= \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 s_{nm} \frac{di_{nm}}{dt}. \end{aligned}$$

ЭДС взаимной индукции фаз по путям рассеяния

$$e_{snm} = -L_a \left( c_{nm} \frac{di_\alpha}{dt} + s_{nm} \frac{di_\beta}{dt} \right).$$

Токи реакции якоря по осям  $\alpha$  и  $\beta$

$$i_\alpha = \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 c_{nm} i_{nm}; \quad i_\beta = \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 s_{nm} i_{nm}.$$

Токи реакции якоря по осям  $d$  и  $q$

$$i_d = i_\alpha \cos \tau + i_\beta \sin \tau; \quad i_q = i_\alpha \sin \tau - i_\beta \cos \tau.$$

Производные токов реакции якоря

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{di_\alpha}{dt} \cos \tau - \frac{di_\beta}{dt} \sin \tau - \omega i_q;$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{di_\alpha}{dt} \sin \tau + \frac{di_\beta}{dt} \cos \tau + \omega i_d.$$

Производные токов в подсетях ротора и токи

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{ad}}{dt} = \frac{L_{kd}}{L_{ad} + L_{kd}} \left( \frac{di_d}{dt} - \frac{R_{kd} i_{kd}}{L_{kd}} \right); \\ i_{kd} = i_{ad} - i_d - i_f; \\ \frac{di_{aq}}{dt} = \frac{L_{kq}}{L_{aq} + L_{kq}} \left( \frac{di_q}{dt} - \frac{R_{kq} i_{kq}}{L_{kq}} \right); \\ i_{kq} = i_{aq} - i_q. \end{array} \right.$$

ЭДС по осям  $d$  и  $q$  при частоте вращения  $\omega$  в системе координат 1-й гармоники

$$e_d = -\omega L_{aq} i_{aq} - L_{ad} \frac{di_{ad}}{dt};$$

$$e_q = \omega L_{ad} i_{ad} - L_{aq} \frac{di_{aq}}{dt}.$$

ЭДС высших гармоник

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{q5} = -5\omega L_{ad5} i_{ad5}; \quad e_{q7} = 7\omega L_{ad7} i_{ad7}; \\ e_{q11} = -11\omega L_{ad11} i_{ad11}; \quad e_{q13} = 13\omega L_{ad13} i_{ad13}; \\ e_{q17} = -17\omega L_{ad17} i_{ad17} \dots \end{array} \right.$$

ЭДС по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_m = \tau - \frac{\pi}{3M} (m-1); \\ e_{\alpha m} = e_d \cos \tau + e_q \sin \tau + e_{q5} \sin(-5\tau_m) + \\ + e_{q7} \sin(7\tau_m) + e_{q11} \sin(-11\tau_m) + \\ + e_{q13} \sin(13\tau_m) + e_{q17} \sin(-17\tau_m) + \dots \\ e_{\beta m} = e_d \sin \tau - e_q \cos \tau - e_{q5} \cos(-5\tau_m) - \\ - e_{q7} \cos(7\tau_m) - e_{q11} \cos(-11\tau_m) - \\ - e_{q13} \cos(13\tau_m) - e_{q17} \cos(-17\tau_m) - \dots \end{array} \right.$$

ЭДС зависимых источников в фазах

$$e_{nm} = e_\alpha c_{nm} + e_\beta s_{nm}.$$

Электромагнитный момент ДПМ при пренебрежении взаимодействием высших временных гармоник тока с высшими пространственными гармониками магнитного поля

$$M_e = 1.5M (L_{ad} i_{ad} i_q - L_{aq} i_{aq} i_d).$$

Частота вращения двухполюсной машины  $\omega$  и угол поворота ротора  $\tau$  при моменте инерции  $J$  определяются электромагнитным моментом  $M_e$  и моментом сопротивления  $M_c$  из следующих выражений (в многополюсных машинах  $J$ ,  $M_e$  и  $\omega$  определяются с учетом числа пар полюсов):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_c - M_e); \quad \frac{d\tau}{dt} = \omega.$$

Если при номинальной частоте вращения машины  $\omega_0$  известны линейное напряжение основной гармоники  $U$ , индуктивность намагничивания  $L_{ad}$  и относительные значения ЭДС высших гармоник  $K_{uj}$ , то токи возбуждения  $i_f$  и  $i_{ff}$  определяются выражениями

$$i_f = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{U}{\omega_0 L_{ad}}; \quad i_{ff} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{K_{uj} U}{j \omega_0 L_{adj}};$$

$$L_{adj} = 1000 L_{ad}, \quad j = 5, 7, 11, 13, 17 \dots$$

**СЭД с АИН и многофазным ДПМ с несинусоидальными ЭДС.** Одно из направлений применения мощных многофазных низковольт-

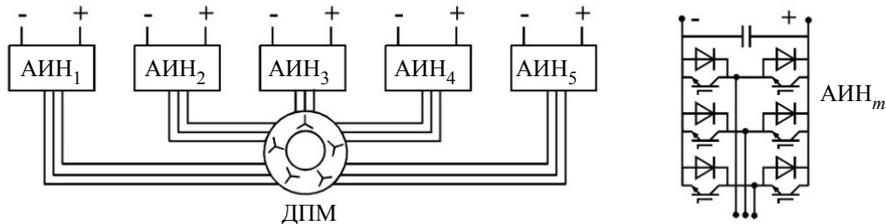


Рис. 3. Схемы СЭД с 15-фазным ДПМ с схема одного из пяти АИН  
Fig. 3. Diagrams of a 15-phase PMSM electric propulsion system with a diagram of one of the five VSIs

ных ДПМ – СЭД судов и кораблей. В таких системах ДПМ питаются обычно через транзисторные АИН. Рассмотрены СЭД с различным количеством трехфазных обмоток ДПМ и соответствующими количествами АИН. На рис. 3 представлена одна из возможных схем СЭД, в которой ДПМ имеет 5 трехфазных обмоток, взаимно сдвинутых по фазе на  $12^\circ$ . Каждая обмотка соединена в звезду. Для питания трехфазных обмоток используются индивидуальные АИН (однотактные или двухтактный). Схема однотактного АИН также представлена на рис. 3.

Система управления СЭД контролирует режим работы ДПМ и воздействует на все АИН, выдавая им задания на поддержание токов в трехфазных обмотках с равными амплитудами. В заданиях по токам учитываются взаимные сдвиги фаз ДПМ. Синусоидальность токов обеспечивается регуляторами АИН.

Необходимо отметить следующее. Проектант ДПМ, определяя конструкцию и оптимизируя режим работы ДПМ, строит для номинального режима такую векторную диаграмму напряжений и токов, в которой реализуются все требования, обеспечивается максимальный КПД, минимальные габариты и масса машины. В системе управления предусматриваются такие уставки, чтобы при разгоне ДПМ и выходе на номинальный режим обеспечивалось соответствие векторной диаграммы машины расчетной диаграмме. Это касается в том числе угла сдвига вектора тока статора относительно оси  $d$  ротора (или оси вектора ЭДС, создаваемых магнитами). Для упрощения системы регулирования этот угол задается неизменным для различных режимов работы (для режимов реверса ДПМ пояснения даны ниже).

**Варианты векторного управления многофазным ДПМ.** В системе управления СЭД можно использовать различные алгоритмы. В одном варианте регулирование осуществляется по мгновенным значениям токов фаз при использовании сигналов датчика положения ротора (ДПР) по скорости  $\omega$  и углу поворота ротора  $\tau$ . Структура СУ отображена на рис. 4.

На рисунке ПИ-регулятор скорости вращения, контролируя заданную  $\omega_{rcs}$  и фактическую  $\omega$  частоты, формирует экстремум  $I_m$  заданных токов фаз АИН с ограничениями  $\pm I_{mx}$ . Заданные токи фаз АИН  $i_{rnm}$  формируются с использованием сигналов  $I_m$ , фаз токов относительно ЭДС возбуждения  $\phi_{IE}$ , сигналов взаимного сдвига по фазе

токов различных обмоток  $\phi_m$ . Угол  $\phi_{IE}$  неизменен по модулю и его знак соответствует знаку тока  $I_m$ , позволяя обеспечить плавные переходы между режимами потребления энергии ДПМ и режимом рекуперации энергии. Углы  $\phi_m$  соответствуют фазам трехфазных обмоток относительно 1-й обмотки. Напряжения управления АИН  $u_{ynjm}$  определяются как суммы «токовых»  $u_{yinjm}$  и «гладких»  $u_{yunjm}$  составляющих. «Токовые» составляющие формируются П-регуляторами токов, на входы которых подаются сигналы по заданным  $i_{rnm}$  и фактическим  $i_{njm}$  токам. Сигналы  $u_{yunjm}$  формируются фильтром напряжений управления. Фильтрация основана на формировании 3-фазной системы единичных сигналов для каждого АИН, на подстройке их частоты и определении амплитуды основных составляющих напряжений управления [8]. В результате определяются амплитуда  $U_{ujm}$ , фаза  $\tau_{ujm}$  и частота  $\omega_{ujm}$  «гладких» составляющих напряжений управления, что позволяет определить их мгновенные значения в фазах  $u_{yunjm}$ . Импульсы управления транзисторами АИН формируются при сравнении пилообразных опорных напряжений и напряжений управления. В АИН двухполярные пилообразные опорные напряжения параллельно включенных АИН взаимно сдвинуты по фазе, что обеспечивает многотактный режим работы системы.

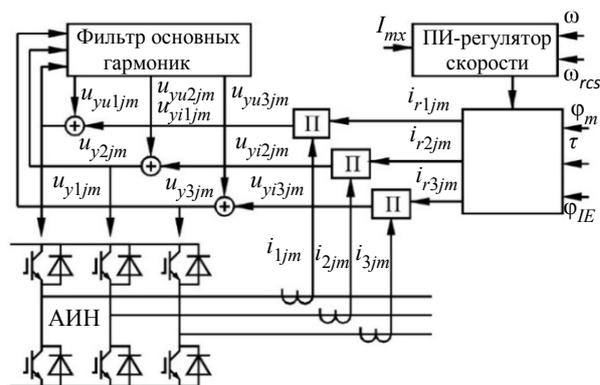


Рис. 4. Структурная схема СУ в осях фаз АИН  
Fig. 4. Structural diagram of the CS in the axes of the VSI phases

В СУ рис. 4 используются П-регуляторы синусоидальных токов фаз ДПМ в сочетании с трехфазным фильтром. Совместное использование этих элементов обеспечивает характеристики СУ, близкие к ПИ-регуляторам (отсутствие погрешности в регулируемых параметрах в установившихся режимах).

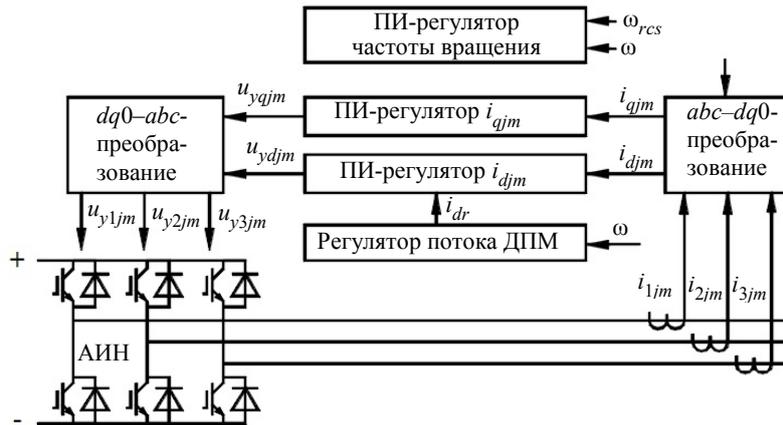


Рис. 5. Структурная схема СУ в осях  $dq$  ротора  
Fig. 5. Structural diagram of the CS in the axes  $dq$  of the rotor

Другой вариант векторной СУ основан на регулировании токов в осях  $dq$  ротора ДПМ. Схема одного канала СУ представлена на рис. 7. Предполагается, что при увеличении частоты вращения и нагрузки ДПМ до номинальных уровней СУ выводит все параметры двигателя на номинальные значения. При этом магнитный поток ДПМ изменяется в зависимости от частоты вращения ротора, что обеспечивается регулятором потока, воздействующим на заданный ток  $i_{dr}$  по оси  $d$  ротора (для АИН с номером  $m$ ).

На входы ПИ-регулятора частоты вращения ДПМ поступают сигналы по заданной и фактической частотам ДПМ. На выходе регулятора формируется заданный ток  $i_{qr}$  по оси  $q$  (для АИН с номером  $m$ ). Фактические проекции токов фаз каждого АИН на оси  $dq$  ротора  $i_{djm}$  и  $i_{qjm}$  определяются в блоке преобразования координат  $abc-dq0$ . Проекции токов по осям  $dq$  устанавливаются на заданных уровнях ПИ-регуляторами. На выходах этих регуляторов по осям  $dq$  для АИН с номером  $m$  формируются напряжения управления  $u_{ydjm}$  и  $u_{yqjm}$ . В блоке преобразования координат  $dq0-abc$  проекции напряжений управления преобразуются в мгновенные значения напряжений управления фаз АИН  $u_{ymjm}$ .

**Расчеты на моделях режимов работы СЭД.** Модели СЭД с использованием представленного математического описания ДПМ, описаний АИН [5] и указанных алгоритмов векторного управления ДПМ в осях фаз и в осях  $dq$  выполнены по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам на языке C++ в среде собственной разработки ComSim [6].

Для проверки и сравнения указанных алгоритмов регулирования (рис. 4 и 5) выполнены расчеты СЭД в переходных и установившихся режимах работы на соответствующих моделях [7]. На рис. 6 представлены результаты расчета пуска, номинального режима и реверса ДПМ, имеющего 5 трехфазных обмоток, питающихся от однотактных АИН (рис. 3). Изображены: частота вращения ДПМ, электромагнитный момент, момент сопротивления на валу ДПМ, ток фазы ДПМ, напряжение управления фазы АИН1, напряжение на входе АИН1. В номинальном режиме мощность ДПМ составляет более 3 МВт; частота тока – 40 Гц; частота ШИМ – 4000 Гц; длительность рассчитанного процесса – 10 с.

Из выполненного анализа следует, что диаграмма рассчитанного процесса (рис. 5) практически не зависит от используемого типа систем векторного управления. Требуемые характеристики СЭД может обеспечить векторное управление как в осях фаз ДПМ, так и в осях  $dq$ .

**Влияние несинусоидальности ЭДС ДПМ на характеристики СЭД при различных вариантах векторного управления.** Один расчет выполнен для СЭД на рис. 3 при исполнении ДПМ с синусоидальными ЭДС фаз. Напряжение питания СЭД принято равным 1000 В. Частота ШИМ в АИН 4 кГц. Частота напряжений ДПМ 13.3 Гц. Мощность двигателя – несколько мегаватт, линейное напряжение обмоток – 600 В. Результаты расчета номинального режима работы СЭД представлены на рис. 7.

Как видно из рисунка, токи фаз ДПМ практически синусоидальны и между одноименными фазами различных 3-фазных обмоток имеется

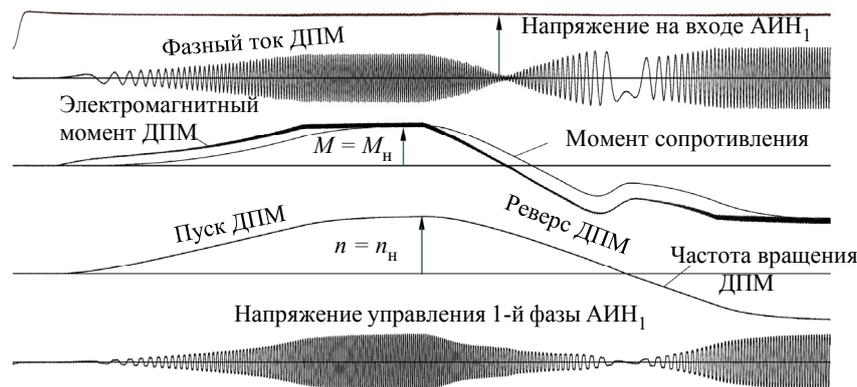


Рис. 6. Пуск, номинальный режим и реверс ДПМ в СЭД  
 Fig. 6. Starting, rated operation and reverse of PMSM in electric propulsion system

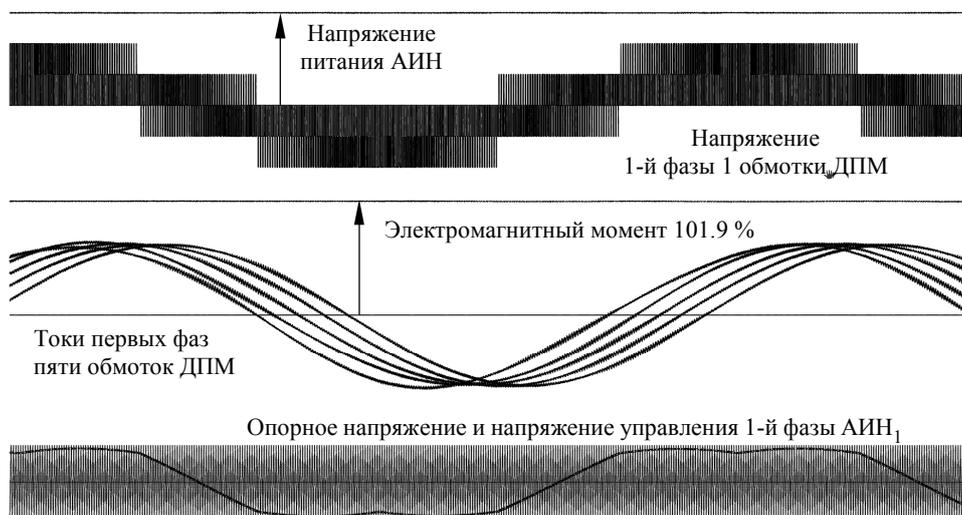


Рис. 7. Пуск, номинальный режим и реверс ДПМ в СЭД  
 Fig. 7. Starting, rated operation and reverse of PMSM in electric propulsion system

сдвиг, приблизительно кратный  $12^\circ$ . В электромагнитном моменте ДПМ пульсации практически отсутствуют. При синусоидальных ЭДС фаз рассматриваемые способы управления обеспечивают практически одинаковое качество электромеханических процессов.

Если ЭДС фаз искажены соответственно кривой на рис. 8, то это различным образом проявляется в электромеханических процессах в СЭД при указанных способах управления.

На рис. 9 представлены диаграммы напряжений, токов и электромагнитного момента в СЭД



Рис. 8. Линейная ЭДС ДПМ на холостом ходу  
 Fig. 8. Line EMF PMSM at no-load mode

при векторном управлении ДПМ в осях  $dq$  и в осях фаз в номинальном режиме работы СЭД.

Из диаграмм видно, что при управлении ДПМ в осях  $dq$  токи фаз искажены в значительно большей степени. Этому можно дать следующие объяснения. В проекциях на оси  $dq$  искаженных токов фаз существуют переменные составляющие. ПИ-регуляторы токов по осям  $dq$  стабилизируют средние значения проекций на заданных уровнях. При этом переменные составляющие проекций токов этими регуляторами не подавляются. Более того, они вызывают появление в выходных сигналах составляющих, которые могут оказывать вредное действие на результат. Очевидно, возможны улучшения системы векторного управления в осях  $dq$ , но они ведут к усложнению системы управления.

При векторном управлении в осях фаз ДПМ проекции токов фаз на оси  $dq$  имеют небольшие

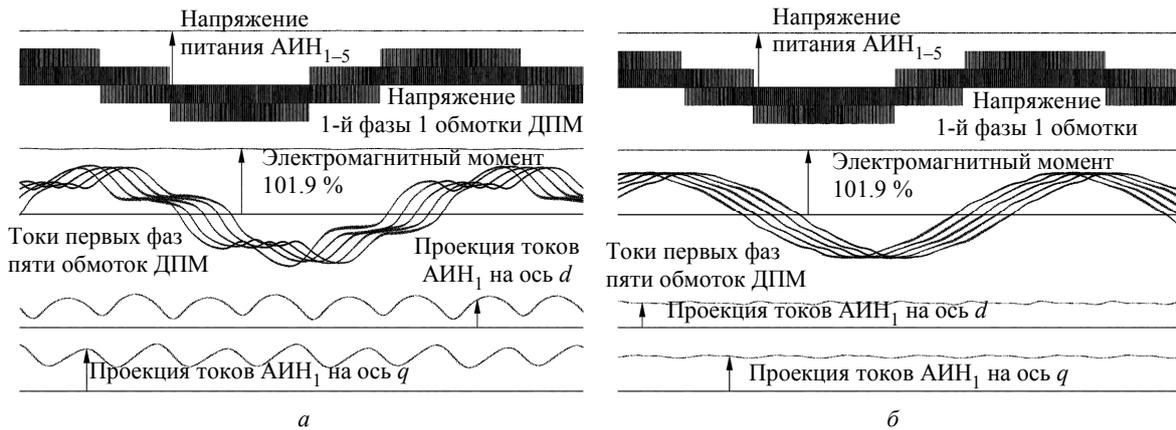


Рис. 9. Диаграммы напряжений, токов и моментов при различных системах векторного управления:  
а – векторное управление в осях  $dq$ ; б – векторное управление в осях фаз

Fig. 9. Diagrams of voltages, currents and moments for various vector control systems:  
а – vector control in the  $dq$  axes; б – vector control in the phase axes

пульсации. При этом токи фаз ДПМ близки по форме к синусоиде.

**Сдвоенные модели систем с ДПМ.** Расчеты длительных режимов работы СЭД с ДПМ и АИН (пуск, реверс и др.) выполняются со значительными затратами машинного времени. Для сокращения этих затрат разработаны также модели для расчета процессов в системах по «гладким» составляющим переменных. В этих моделях ускорение расчетов достигается за счет исключения из моделей полупроводниковых элементов [8]. Чтобы точность расчетов не оказалась сниженной, разработаны также сдвоенные модели [8]. И в тех, и в других моделях использовано представленное ранее математическое описание ДПМ.

#### Выводы.

1. Создана математическая модель синхронного двигателя на постоянных магнитах с произвольным

количеством взаимно сдвинутых по фазе трехфазных обмоток, в которой учитывается влияние на форму ЭДС размещения магнитов на роторе, а также конструкции статора (количества и формы зубцов и пазов, скоса пазов, сокращения шага обмоток, распределения обмоток, соединения фаз).

2. Создан комплекс моделей систем электродвижения с АИН различной структуры и синхронными двигателями на постоянных магнитах с несинусоидальными ЭДС.

3. Выполнено сравнение векторного управления в осях  $dq$  с векторным управлением в осях фаз для СЭД с двигателями на постоянных магнитах с несинусоидальными ЭДС. При регулировании в осях фаз пульсации фазных токов и электромагнитного момента меньше.

#### Список литературы

1. Математическая модель синхронного двигателя с постоянными магнитами с учетом трапецеидальной формы ЭДС URL: [https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/permanentmagnetsynchronousmachine.html?s\\_tid=srchtitle\\_Permanent%20Magnet%20Synchronous%20Motor%20with%20no-sinusoidal%20flux\\_1](https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/permanentmagnetsynchronousmachine.html?s_tid=srchtitle_Permanent%20Magnet%20Synchronous%20Motor%20with%20no-sinusoidal%20flux_1) (дата обращения 14.06.2022).
2. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab. SymPowerSystem и Simulink / М.: ДМК-пресс, 2014 г. 288 с.
3. Калачев Ю. Н. Моделирование в электроприводе. SimInTech. М.: ДМК-пресс, 2019. 106 с.
4. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов // СПб.: ОАО «Силовые машины» «Электросила», 2004. 252 с.

5. Воронцов А. Г. Развитие методологии моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам и комплекс моделей в ComSim // Изв. СПбГЭТУ. 2022. № 3. С. 57–65.
6. Воронцов А. Г. Программа для ЭВМ ComSim1\_5 / № св. 2019661058. Дата регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ 19.08.2019.
7. Пульсации токов и момента многофазного двигателя на постоянных магнитах в зависимости от алгоритма управления / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, С. М. Шопин, А. Р. Мамутов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 4. С. 47–52.
8. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих сдвоенных моделях / Электротехника. 2021. № 1. С. 20–25.

### Информация об авторе

**Воронцов Алексей Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент каф. робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».  
E-mail: ag.voroncov@gmail.com

### References

1. Matematicheskaya model' sinhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami s uchetom trapeceidal'noj formy EDS URL: [https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/permanentmagnetsynchronousmachine.html?s\\_tid=srchtitle\\_Permanent%20Magnet%20Synchronous%20Motor%20with%20no-sinusoidal%20flux\\_1](https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/permanentmagnetsynchronousmachine.html?s_tid=srchtitle_Permanent%20Magnet%20Synchronous%20Motor%20with%20no-sinusoidal%20flux_1) (data obrashchenia 14.06.2022). (In Russ.).
2. CHernyh I. V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustrojstv v MatLab. SymPowerSystem i Simulink / M.: DMK-press, 2014 g. 288 s. (In Russ.).
3. Kalachev YU. N. Modelirovanie v elektropri-vode. SimInTech. M.: DMK-press, 2019. 106 s. (In Russ.).
4. Pronin M. V., Voroncov A. G., Kalachikov P. N., Emel'yanov A. P. Elektroprivody i sistemy s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami (modelirovanie, raschet, primenenie). SPb.: OAO «Silovye mashiny» «Elektrosila», 2004. 252 s. (In Russ.).
5. Voroncov A. G. Razvitie metodologii modelirovaniya EMTS po vzaimosvyazannym podsistemam i kompleks modelej v ComSim // Izv. SPbGETU. 2022. № 3. S. 57–65. (In Russ.).
6. Voroncov A. G. Programma dlya EVM ComSim1\_5 / № sv. 2019661058. Data registracii v Federal'noj sluzhbe po intellektual'noj sobstvennosti RF 19.08.2019. (In Russ.).
7. Pronin M. V., Voroncov A. G., SHopin S. M., Mamutov A. R. Pul'sacii tokov i momenta mnogo-faznogo dvigatelya na postoyannyh magnetah v zavisimosti ot algoritma upravleniya / Izv. SPbGETU «LETI». 2014. № 4. S. 47–52. (In Russ.).
8. Voroncov A. G., Pronin M. V. Raschet sistem s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami na bystrodeystvuyushchih sdvoennyh modelyakh / Elektrotehnika. 2021. № 1. S. 20–25. (In Russ.).

### Information about the author

**Aleksey G. Vorontsov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Robotics and Automation of Production systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.  
E-mail: ag.voroncov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 31.05.2022; принята к публикации после рецензирования 16.06.2022; опубликована онлайн 13.09.2022.

Submitted 31.05.2022; accepted 16.06.2022; published online 13.09.2022.