

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПОСОБОВ ПИТАНИЯ СДПМ В РЕЖИМЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

С.Г. Воронин, voroninsg@susu.ru

Д.А. Курносов, kurnosovda@susu.ru

Н.В. Клиначев, klinachevnn@susu.ru

Н.Ю. Кулёва, kulevani@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье даётся сравнительная оценка различных способов питания синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) в режиме вентильного двигателя (ВД). Численно на аналитических и на компьютерных моделях рассчитаны механические $\omega = f(M)$, зависимость скорости от электромагнитного момента и энергетические $\eta_e = f(M)$, зависимость электромагнитного КПД от момента, характеристики двигателя при синусоидальном питании и дискретной коммутации с различными значениями относительной индуктивности обмотки. Исследованы пульсации момента. Рассмотрено три наиболее распространённых способа дискретной коммутации: 120-, 180- и 150-градусная. Показано, что дискретная 120-градусная коммутация обеспечивает наибольшее, по сравнению с другими способами, значение η_e , а механические характеристики по виду примерно одинаковы при различных способах питания. Исследование пульсаций момента показало, что дискретная коммутация без дополнительных мероприятий не может конкурировать по этому показателю со случаем синусоидального питания, который теоретически имеет нулевые пульсации момента. Однако использование 150-градусной коммутации позволяет значительно их уменьшить, приблизив к 2...3 %. Приведены кривые, позволяющие приближённо оценить ожидаемые пульсации момента для всех дискретных способов коммутации. Даны практические рекомендации по выбору способа питания СДПМ.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, вентильный двигатель, дискретная коммутация, векторное управление, механическая характеристика, электромагнитный КПД, пульсации момента

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20124, <https://rscf.ru/project/22-29-20124/>

Для цитирования: Сравнительная оценка способов питания СДПМ в режиме вентильного двигателя / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, Н.В. Клиначев, Н.Ю. Кулёва // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 3. С. 52–61. DOI: 10.14529/power220306

Original article
DOI: 10.14529/power220306

COMPARATIVE EVALUATION OF THE METHODS OF POWERING THE PMSM IN A THYRATRON MOTOR MODE

S.G. Voronin, voroninsg@susu.ru

D.A. Kurnosov, kurnosovda@susu.ru

N.V. Klinachev, klinachevnn@susu.ru

N.Yu. Kuleva, kulevani@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article provides a comparative assessment of various ways of powering a synchronous motor with permanent magnets (PMSM) in the mode of a thyatron motor (TM). Numerically, on analytical and computer models, mechanical $\omega = f(M)$, the dependence of speed on electromagnetic torque, and energy $\eta_e = f(M)$, the dependence of electromagnetic efficiency are calculated from the moment, the characteristics of the motor with sinusoidal power supply and discrete switching with different values of the relative inductance of the winding. Moment pulsations are investigated. The three most common methods of discrete degree commutation are considered – 120, 180 and 150. It is shown that discrete 120 degree commutation provides the highest value of η_e in comparison with other methods, and the mechanical characteristics are approximately the same in appearance with different power supply methods. The study of moment pulsations has shown that discrete switching without additional measures cannot compete in this indicator with the case of sinusoidal power supply, which theoretically has zero moment pulsations. However, the use of 150 degree

commutation makes it possible to significantly reduce them, bringing them closer to 2...3 %. Curves are given that allow an approximate estimate of the expected moment pulsations for all discrete switching methods. Practical recommendations on the choice of the method of powering the PMSM are given.

Keywords: synchronous motor with permanent magnets, thyatron motor, discrete switching, vector control, mechanical characteristic, electromagnetic efficiency, moment pulsations

Acknowledgments: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-29-20124, <https://rscf.ru/project/22-29-20124/>

For citation: Voronin S.G., Kurnosov D.A., Klinachev N.V., Kuleva N.Yu. Comparative evaluation of the methods of powering the PMSM in a thyatron motor mode. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering.* 2022;22(3):52–61. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220306

Введение

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), работающие в режиме вентильного двигателя (ВД), нашли в последнее время широкое применение в различных отраслях техники [1–5]. Для реализации векторного управления такими двигателями при питании их от источника трёхфазного синусоидального напряжения наибольшее распространение получил принцип формирования вектора потока статора путём управления токами по ортогональным осям d и q во вращающейся системе координат, связанной с намагниченным ротором [6–9]. За счёт изменения каждой из составляющих результирующего вектора тока (i_d и i_q) удаётся регулировать угол между полями ротора и статора и амплитуду вектора поля статора. Такой подход при расчёте токов требует два преобразования координат – от неподвижной трёхфазной системы к вращающейся двухфазной и после формирования заданных значений токов i_d и i_q , наоборот, – от двухфазной к трёхфазной системе. Как правило, такое преобразование осуществляется стандартными программами и требует дополнительных вычислительных ресурсов и чаще всего импортных стандартных преобразователей [10–12]. Кроме того, эффективность метода существенно снижается при наличии несинусоидальности токов или потокосцеплений.

Между тем, при наличии датчика углового положения ротора двигателя относительно осей статорной обмотки, взяв за начало отсчёта магнитную ось одной из фаз, мы можем непосредственно измерять угол между полями ротора и статора. На практике лучше пользоваться углом между ЭДС вращения и первой гармоникой напряжения двигателя, который связан с углом между векторами полей ротора и статора. Регулируя этот угол путём сдвига по фазе трёхфазного напряжения или тока относительно фазной ЭДС, мы можем изменять вид рабочих характеристик привода [13, 14]. При этом упрощается схема управления, сокращается количество вычислительных процедур и исключаются ошибки, обусловленные несинусоидальностью токов и потокосцеплений. Такой метод называют методом фазового векторного управления (ФВУ).

В некоторых приводах весьма эффективным оказывается применение двигателей с дискретной

коммутацией фазных обмоток. Эти двигатели называют бесконтактными двигателями постоянного тока (БДПТ) [15, 16]. С точки зрения технической реализации электропривод с дискретной коммутацией фазных обмоток оказывается значительно проще электропривода с позиционной модуляцией фазных напряжений по синусоидальному закону. Это объясняется тем, что управление коммутацией фаз может быть реализовано по простым алгоритмам на простейших микроконтроллерах, а частота ШИМ фазных напряжений при управлении двигателем может быть существенно снижена, так как нет необходимости формирования их по синусоидальному закону. Особенно это важно в электроприводах, где требуется высокая частота напряжения питания электродвигателя. Очевидно, что в таком приводе невозможно реализовать векторное управление с регулированием токов по осям d и q , так как токи и напряжения в них существенно несинусоидальны, но вполне возможна реализация ФВУ.

Постановка задачи исследования

Прежде чем рассматривать вопросы ФВУ, необходимо уточнить, какие из способов дискретной коммутации наиболее эффективны, и оценить, как они соотносятся по виду механических характеристик и энергетических показателей, а также пульсациям электромагнитного момента между собой и со случаем синусоидального напряжения питания. Это позволит обоснованно выбрать тот или иной способ питания СДПМ и способ векторного управления. В настоящей статье предпринята попытка осуществить такую оценку.

Математическое описание статических характеристик электродвигателей

Для математического описания статических характеристик СДПМ с неявно выраженными полюсами при синусоидальном питании воспользуемся известными из классической теории таких машин уравнениями для токов по осям d и q [17]:

$$I_d = \frac{U_m(-r\sin\theta + \omega l \cos\theta) - \omega l E_m}{(\omega l)^2 + r^2}, \quad (1)$$

$$I_q = \frac{U_m(r\cos\theta + \omega l \sin\theta) - r E_m}{(\omega l)^2 + r^2}. \quad (2)$$

Здесь r – активное сопротивление фазной обмотки; l – индуктивность фазной обмотки с учётом взаи-

моиндуктивности с другими фазами; U_m, E_m – амплитуда напряжения и ЭДС соответственно; $m = 1, 2, 3$ – номер фазы; θ – угол сдвига между векторами напряжения и ЭДС, ω – скорость вращения ротора в электрических координатах.

Электромагнитная мощность двигателя определяется выражением

$$P_3 = \frac{3}{2} E_m I_q. \quad (3)$$

Электромагнитный момент определим из соотношения

$$M_3 = \frac{P_3}{\omega} = \frac{3}{2} \psi_m I_q, \quad (4)$$

где ψ_m – коэффициент связи между амплитудой фазной ЭДС и частотой вращения ротора.

Потребляемую активную мощность определим из соотношения

$$P_a = U_d I_d + U_q I_q = -\frac{3}{2} U_m \sin\theta I_d + \frac{3}{2} U_m \cos\theta I_q.$$

Подставим токи и после преобразований получим

$$P_a = \frac{3}{2} \frac{U_m (E_m (\omega \sin\theta - r \cos\theta) + r U_m)}{(\omega l)^2 + r^2}. \quad (5)$$

Под электромагнитным КПД принято понимать отношение электромагнитной мощности к потребляемой активной, поэтому его будем считать по выражению

$$\eta_3 = \frac{P_3}{P_a} \quad (6)$$

Для того чтобы сравнивать различные способы питания двигателей, хотелось бы иметь такие же относительно простые выражения для расчёта перечисленных выше величин и для случая дискретной коммутации. Существует несколько способов дискретной коммутации трёхфазной обмотки (СДПМ). Мы рассмотрим наиболее распространённые из них [18].

180-градусная шеститактная коммутация, при которой на каждом межкоммутационном интервале (МКИ) к источнику питания через полупроводниковый коммутатор оказываются подключёнными три фазы, как показано на схеме замещения (рис. 1а).

120-градусная шеститактная коммутация, когда на каждом МКИ к источнику питания оказываются подключёнными две фазы (рис. 1б).

150-градусная двенадцатитактная коммутация, представляющая собой сочетание первых двух, когда обмотка двигателя, чередуясь, подключается к источнику постоянного тока по схеме рис. 1а и 1б.

Если пренебречь индуктивностью рассеяния статорной обмотки, то можно получить относительно простые выражения для описания механической (МХ) и энергетической характеристик (ЭХ) [19, 20]. В относительных единицах при нулевом значении угла коммутации ($\theta = 0$) они имеют вид:

$$\eta = \frac{v(k_1 - v)}{(1 - k_1 v)}, \quad (6a)$$

$$\mu = (k_1 - v); \quad (7a)$$

$$\eta = \frac{v(k_1 - k_2 v)}{(1 - k_1 v)}, \quad (6b)$$

$$\mu = (k_1 - k_2 v). \quad (7b)$$

Также по уравнениям (3)–(6) можно представить в относительных единицах электромагнитный КПД и электромагнитный момент для случая синусоидального питания двигателя:

$$\eta = v; \quad (6в)$$

$$\mu = 1 - v. \quad (7в)$$

В уравнениях обозначено v и μ соответственно относительная скорость и относительный электромагнитный момент двигателей при нулевой индуктивности и нулевом угле коммутации, а коэффициенты определяются по выражениям $k_1 = 3/\pi$, $k_2 = \frac{1}{2}(1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi})$. В качестве базовых величин примем мощность и момент в пусковом режиме (P_n, M_n), а также скорость, при которой амплитуда ЭДС вращения равна амплитуде напряжения при синусоидальном питании, или ЭДС эквивалентной обмотки (см. рис. 1) равняется напряжению на шинах постоянного тока. В частности, учитывая, что амплитуда выходного напряжения трёхфазного мостового инвертора в лучшем

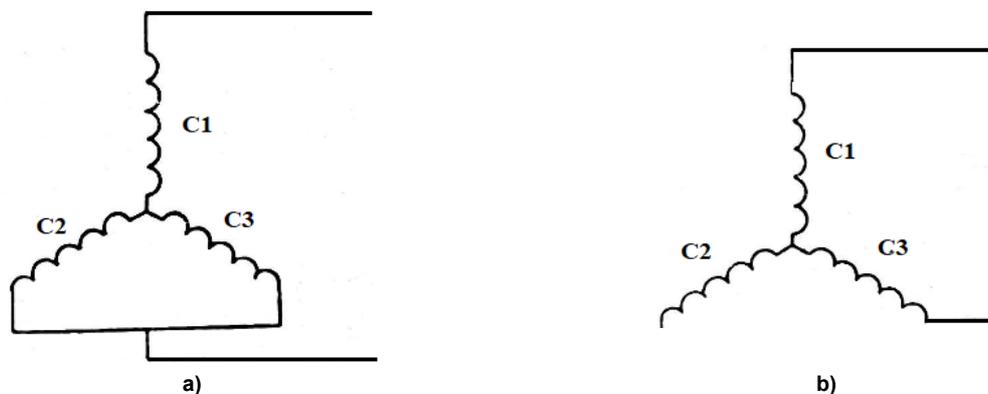


Рис. 1. Схема подключения фаз СДПМ к источнику постоянного тока:
а – при 180-градусной коммутации; б – при 120-градусной коммутации
Fig. 1. Wiring diagrams of phases of PMSM to a DC source:
a – at 180-degree commutation; b – at 120-degree commutation

случае равна $U_a = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$, а также принимая во внимание схемы рис. 1, получим:

$$M_6 = \frac{U_n}{\frac{2}{3}r} \cdot \frac{3}{2} \psi_{ш}; \quad \omega_6 = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_n}{\psi_{ш}}; \quad (A)$$

$$M_6 = \frac{U_n}{2r} \cdot \sqrt{3} \psi_{ш}; \quad \omega_6 = \frac{U_n}{\sqrt{3} \psi_{ш}}; \quad (B)$$

$$M_6 = \frac{\sqrt{3} U_n}{2r} \cdot \sqrt{3} \psi_{ш}; \quad \omega_6 = \frac{U_n}{\sqrt{3} \psi_{ш}} \quad (B)$$

– для 150-градусной коммутации аналитические соотношения для зависимостей $\mu = f(v)$ и $\eta_b = f(v)$ выводить не будем, полагая, что они будут находиться между характеристиками 120- и 180-градусной коммутации, что будет показано ниже в результате численных расчётов.

В некоторых случаях к электроприводу предъявляются требования по допустимым пульсациям момента в процессе вращения ротора. Оценивать такие пульсации будем по угловой моментной характеристике двигателя. Сразу можно отметить, что при синусоидальном питании в идеальном случае линейности магнитной системы такие пульсации отсутствуют. Что касается дискретной коммутации, то здесь в течение МКИ момент будет меняться в связи с дискретным характером электромагнитных процессов. При нулевой индуктивности пульсации момента достаточно просто получить аналитически. В частности, согласно [19, 20], для 180-градусной коммутации наличие короткозамкнутого контура даёт дополнительное изменение момента. В результате имеем

$$\mu = \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) - v \cdot \cos^2\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin^2\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) v^2. \quad (8a)$$

Для 120-градусной коммутации при нулевой индуктивности и при $\theta = 0$ мгновенное относительное значение момента на МКИ можно записать соотношением

$$\mu = \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) - v \cdot \cos^2\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right), \quad (8б)$$

где $\varphi = \omega t$ – текущее значение угла поворота ротора на МКИ, изменяющееся в интервале от 0 до $\pi/3$.

При 150-градусной коммутации характер изменения момента по аналогичным выражениям необходимо оценивать на интервале $\delta = \pi/6$ для обеих схем рис. 1.

К сожалению, аналогичные наглядные выражения для мощностей и моментов ВД при ненулевой индуктивности могут быть представлены только при синусоидальном питании. Для расчёта мгновенных фазных токов и мощностей в установленном режиме для дискретной коммутации придётся решать дифференциальные уравнения электромагнитных коммутационных процессов, как это показано, например, в [18], и по ним определять средние интегральные на МКИ значения токов и мощностей.

Для выполнения сравнительного анализа способов питания статора вентильного двигателя с учётом индуктивности статорной обмотки в программе Simulink была составлена вычислительная модель. Основу модели составил идеальный источник угловой скорости с программируемым номиналом. На его валу укреплено устройство коммутации (многоканальный барабан переключений). В зависимости от угла поворота в соответствии с предустановленной программой, а это – 120-, 150- или 180-градусная коммутация, барабан формирует управление для транзисторов стоек силового трехфазного моста, осуществляя синтез напряжений, питающих статор двигателя. Двигатель и идеальный источник угловой скорости имеют общий вал. Какой бы момент ни создавал вентильный двигатель – во всех режимах вал крутит идеальный источник угловой скорости, характеризующийся бесконечной мощностью и нулевым внутренним сопротивлением. Например, для снятия естественной механической характеристики вентильного двигателя скорость увеличивается линейно от нуля до номинальной.

Поставленные вычислительные эксперименты проводились при угле коммутации, равном нулю. Магнитная составляющая тока, I_d , была положительной. Токи пусковые. Статор глубоко насыщен. Поэтому цепь влияния магнитной составляющей тока на момент, в библиотечной, линейной, модели СДПМ программы Simulink была отключена (во всех режимах ψ_m был принят равным константе).

Для удобства представим скорость и момент также в относительных единицах, приняв за базовые значения каждого способа питания уже принятые базовые величины, а расчёт проведём для различных значений относительной индуктивности $\xi = \frac{L\omega_6}{r}$. Это позволит нам независимо от параметров двигателей оценить влияние индуктивности на их характеристики при различных способах коммутации. Для определённости, в качестве объекта исследований был взят моментный двигатель МД-500 со следующими параметрами:

- напряжение постоянного тока $U_n = 24$ В;
- активное сопротивление фазной обмотки $R = 1$ Ом;
- индуктивность фазной обмотки $L = 0,5$ мГн;
- максимальное потокоцепление поля ротора $\psi_m = 0,04$ Вб;
- число пар полюсов $p = 5$.

Численный эксперимент проводился при нулевой, номинальной и завышенной в десять раз индуктивности статорной обмотки.

Расчёт характеристик и моделирование электромагнитных процессов в приводе

Случай нулевой индуктивности рассеяния статорной обмотки нереален, тем не менее он позволяет дать наглядную сравнительную оценку для различных способов питания с точки зрения элек-

трических потерь, вида механических характеристик и пульсаций момента. По представленным выше уравнениям рассчитаны МХ и ЭХ (рис. 2 и 3).

Пульсации момента лучше также представить в относительном виде

$$\delta = \frac{\mu^H}{\mu^C} \quad (9)$$

где примем μ^H и μ^C соответственно момент в начале

и в середине МКИ, определяемые по уравнениям (8). Результаты расчета представлены на рис. 4 и 5.

Анализ кривых, представленных на рис. 2 и 3, позволяет заключить, что при нулевой индуктивности:

- МХ линейны для всех способов питания ВД;
- с точки зрения энергетических показателей в широком диапазоне изменения скоростей вращения

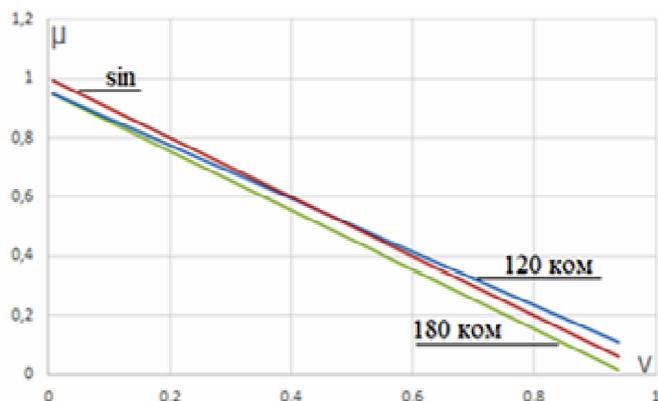


Рис. 2. Механическая характеристика при $L = 0$
Fig. 2. Mechanical characteristic at $L = 0$

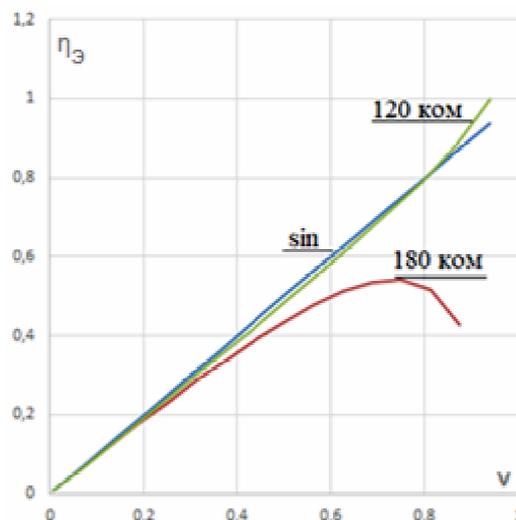


Рис. 3. Энергетическая характеристика при $L = 0$
Fig. 3. Energy characteristic at $L = 0$

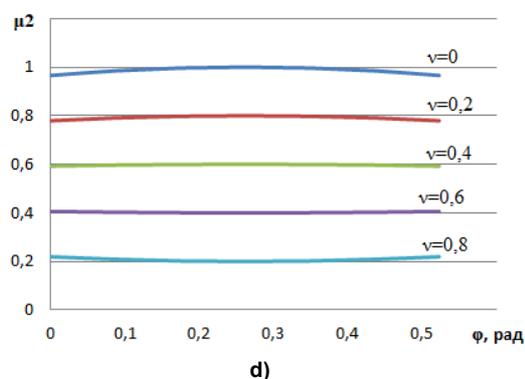
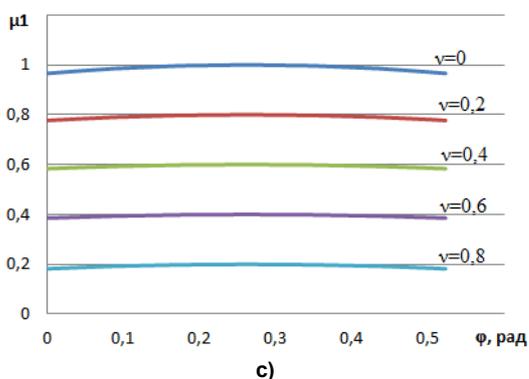
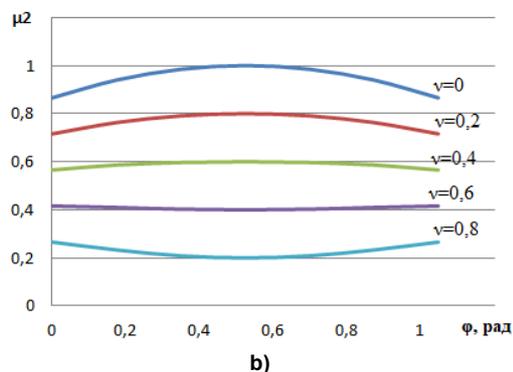
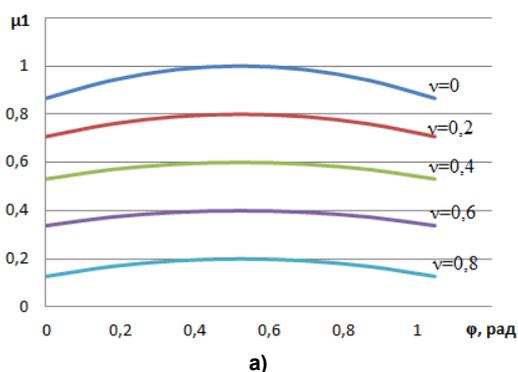


Рис. 4. Кривая изменения момента в течение МКИ: а – 6-тактная 180-градусная коммутация; б – 6-тактная 120-градусная коммутация; с – 12-тактный интервал, соответствующий рис. 1а; д – 12-тактный интервал, соответствующий рис. 1б

Fig. 4. Torque change curve during MCI: a – 6-stroke 180-degree switching; b – 6-stroke 120-degree switching; c – 12-clock interval corresponding to Fig. 1a; d – 12-clock interval corresponding to Fig. 1b

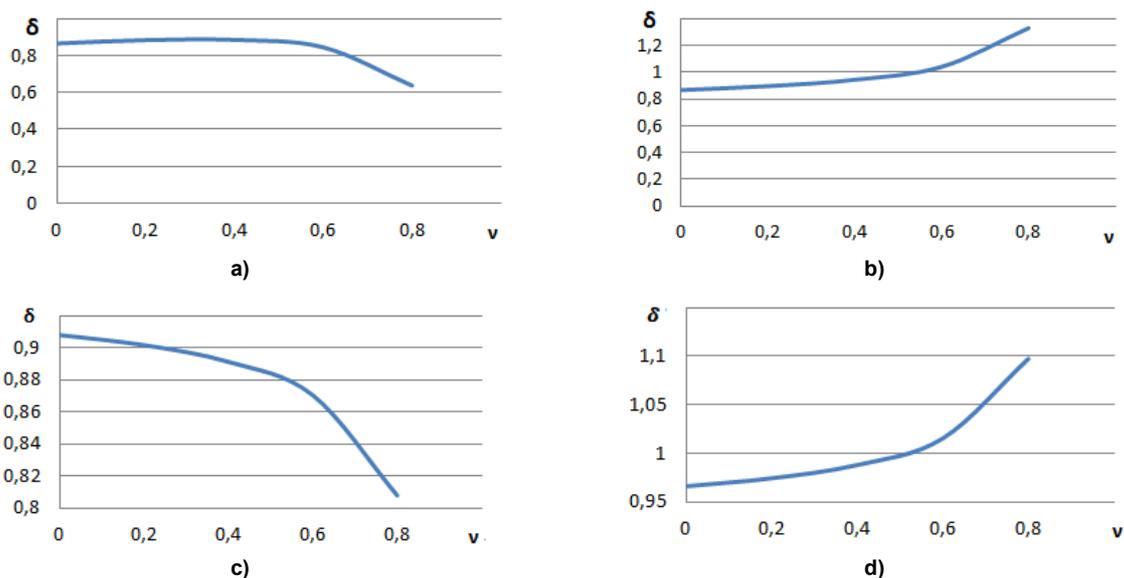


Рис. 5. Кривая пульсаций момента: а – 6-тактная 180-градусная коммутация; б – 6-тактная 120-градусная коммутация; с – 12-тактный интервал, соответствующий рис. 1а; д – 12-тактный интервал, соответствующий рис. 1б
Fig. 5. Torque ripple curve: а – 6-stroke 180-degree commutation; б – 6-stroke 120-degree commutation; с – 12 clock interval corresponding to Fig. 1а; д – 12 clock interval corresponding to Fig. 1б

ния привода наиболее предпочтительна дискретная 120-градусная коммутация;

– с точки зрения пульсаций момента несомненное преимущество имеет синусоидальное питание, а из дискретных способов предпочтительна 150-градусная коммутация.

Результаты исследования привода на модели с учётом индуктивности обмотки представлены в виде кривых $\mu = f(\omega)$, $\eta_p = f(\omega)$ для каждого способа коммутации и различных значений относительной индуктивности (рис. 6, 7).

Анализ этих кривых позволяет заключить, что с ростом относительной индуктивности внешний вид МХ и ЭХ становится качественно одинаковым при всех способах питания двигателя. Однако лучшую линейность и большее значение электромагнитного КПД по сравнению со

всеми способами питания даёт 120-градусная коммутация.

Что касается пульсаций момента, то нас интересует количественное отличие их при различных способах коммутации, разных относительных индуктивностях и разных скоростях вращения. Поэтому картинка пульсаций момента по результатам моделирования представлена в виде годографа момента в процессе разгона двигателя от нулевой скорости до $v = 0,3$ (рис. 8, 9).

Анализ годографов позволяет заключить:

- как и ожидалось, минимальные пульсации момента получим при 150-градусной коммутации;
- наибольшие пульсации момента имеем при 180-градусной коммутации;
- с ростом относительной индуктивности пульсации увеличиваются;

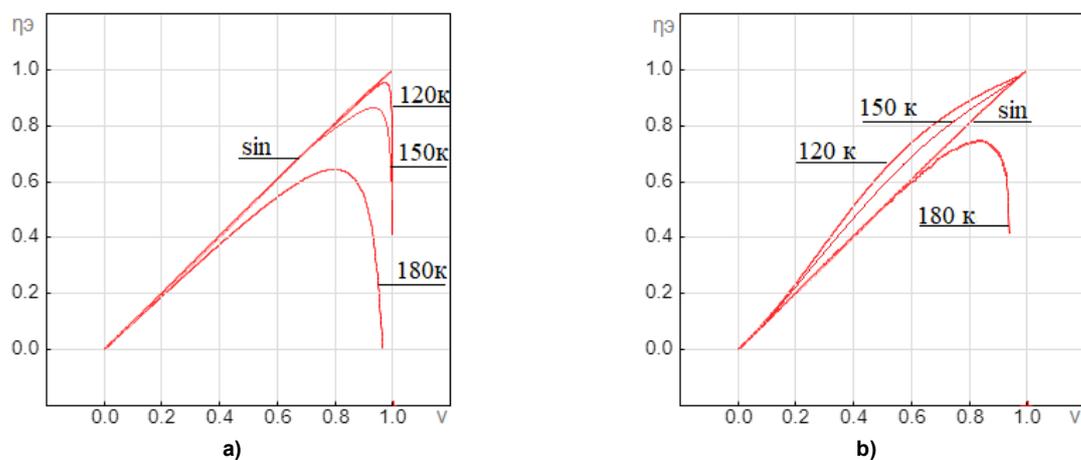


Рис. 6. Энергетическая характеристика при $\xi = 0,5$ (а) и $\xi = 5$ (б)
Fig. 6. Energy characteristic at $\xi = 0,5$ (а) and $\xi = 5$ (б)

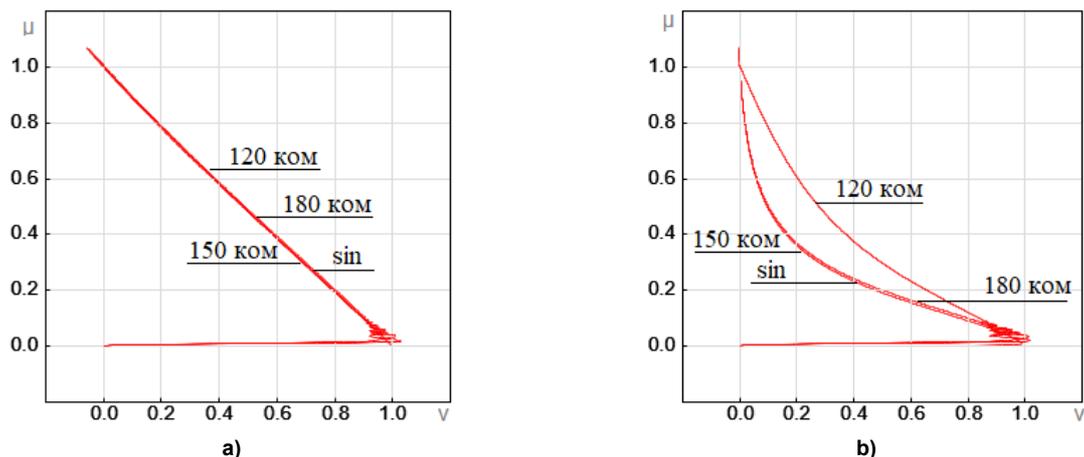


Рис. 7. Механическая характеристика при $\xi = 0,5$ (а) и $\xi = 5$ (б)
Fig. 7. Mechanical characteristic at $\xi = 0,5$ (a) and $\xi = 5$ (b)

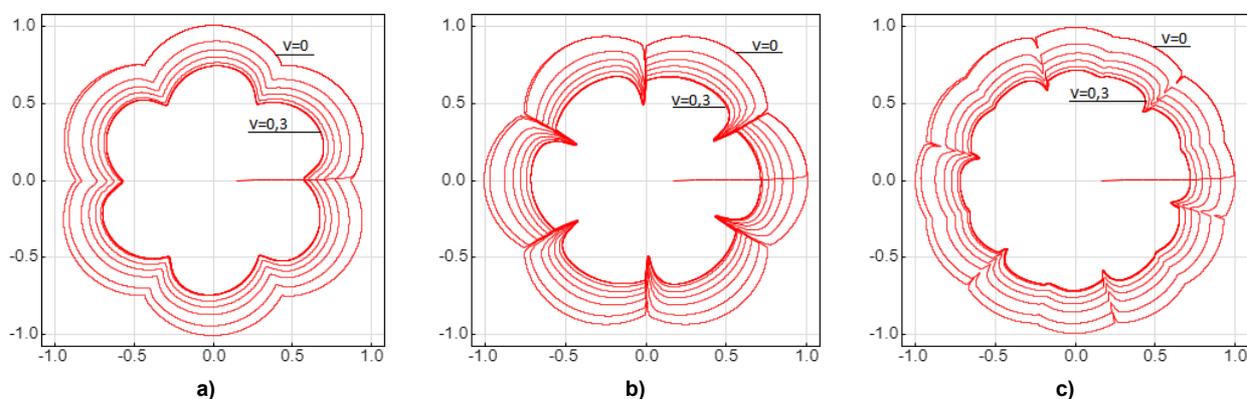


Рис. 8. Голографы момента при $\xi = 0,5$: а – 180-градусная коммутация;
б – 120-градусная коммутация; с – 150-градусная коммутация
Fig. 8. Hodographs of the moment at $\xi = 0,5$: a – 180-degree switching;
b – 120-degree switching; c – 150-degree switching

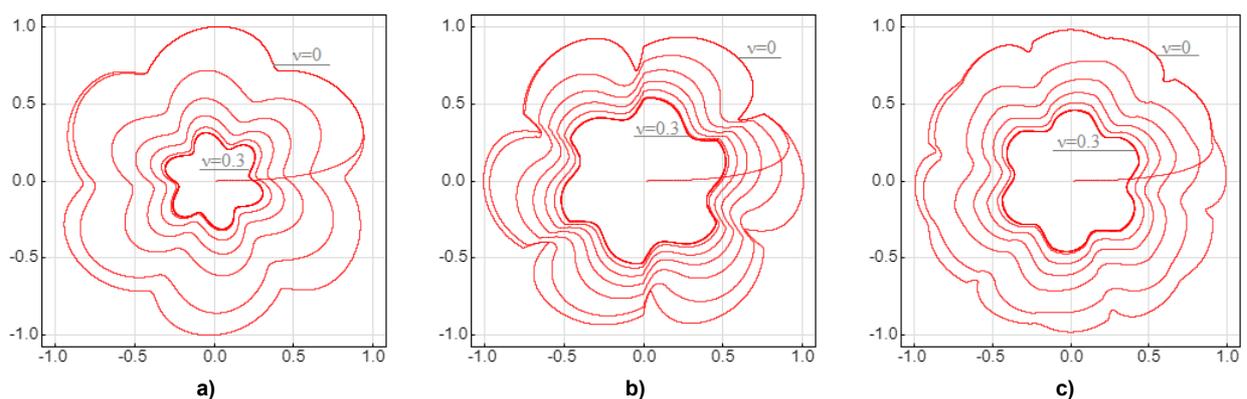


Рис. 9. Голографы момента при $\xi = 5$: а – 180-градусная коммутация;
б – 120-градусная коммутация; с – 150-градусная коммутация
Fig. 9. Hodographs of the moment at $\xi = 5$: a – 180-degree switching;
b – 120-degree switching; c – 150-degree switching

– пульсации увеличиваются также и с ростом скорости;
– количественно и качественно пульсации момента при нулевой индуктивности примерно совпадают с пульсациями при ненулевой индуктивно-

сти, особенно это проявляется при небольших относительных скоростях вращения (до $v \approx 0,5$), когда они приближаются к нулю;
– при увеличении относительной индуктивности становится существенным влияние вызванных

коммутационными процессами дополнительных пульсаций тока, следовательно, и момента (см. рис. 8 и 9).

Практическая часть

Результаты проведённого анализа позволяют решать практические задачи выбора способа питания СДПМ в режиме вентильного двигателя в зависимости от основных технических требований. В частности:

- если определяющим является требование обеспечения максимального значения электромагнитного КПД, лучше использовать дискретную 120-градусную коммутацию;
- в случае жёстких требований по пульсациям момента необходимо использовать синусоидальное питание;
- если мы хотим получить низкие пульсации и использовать более простую схему с дискретной коммутацией, рекомендуется применять 150-градусную двенадцатитактную коммутацию;
- ожидаемые пульсации момента в приводе во всём диапазоне скоростей и для всех способов коммутации приближённо можно просто определить по кривым рис. 5.

– результаты исследований можно уверенно распространить на приводы с мощностями до десятков кВт;

– в двигателях в сотни кВт активное сопротивление обмотки оказывается пренебрежительно мало, поэтому дискретная коммутация приводит к значительным выбросам энергии через обратные вентили инвертора и оказывается неэффективной.

Заключение

Сравнительная оценка различных способов питания СДПМ в режиме вентильного двигателя позволяет сделать вывод о том, что в целом ряде общепромышленных механизмов и машин, где нет жёстких ограничений по пульсациям момента – насосы, вентиляторы, транспортёры и др., – с успехом может быть использована простая и более экономичная по энергопотреблению по сравнению с синусоидальным питанием дискретная 120-градусная коммутация. В том случае, если имеются ограничения по пульсациям момента на уровне не более 5 % можно использовать 150-градусную дискретную коммутацию, при более жёстких требованиях лучше использовать синусоидальное питание.

Список литературы

1. Бербиренков И.А., Лохнин В.В. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе автомобиля // Известия Томского политехнического университета. 2011. № 4 (318). С. 148–150.
2. Громышева А.Д., Овчинников И.Е., Егоров А.В. Управление скоростью и моментом вентильного двигателя в приводе транспортных средств // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 3 (73). С. 43–52.
3. Микропроцессорная система прямого управления моментом электроприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами / А. Рефки, А.С. Каракулов, Ю.Н. Дементьев, С.Н. Кладиев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. № 6. С. 62–66.
4. Сизякин А., Румянцев М. Управление вентильными электродвигателями на базе системы iMotion компании International Rectifier // Силовая электроника. 2012. № 2. С. 38–43.
5. Campbell-Kelly M., Croarken M., Flood R.G. The History of Mathematical Tables from Sumer to Spreadsheets. Oxford: Oxford University Press, 2003. DOI: 10.1086/491481
6. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. 298 с.
7. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика): метод. пособие. М.: ЭФО, 2013. 63 с.
8. Современные типы синхронных двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе и способы управления ими / А.С. Поздеев, В.М. Казакбаев, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский. // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием (Екатеринбург, 16–19 декабря 2014 г.): в 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2015. Т. 1. С. 188–192.
9. Векторное управление двигателем // Инженерные решения [Электронный ресурс]. URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector> (дата обращения: 11.08.2022).
10. Синхронный двигатель с постоянными магнитами // Инженерные решения [Электронный ресурс]. <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm> (дата обращения: 11.08.2022).
11. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами / А. Рефки, А.С. Каракулов, Ю.Н. Дементьев, С.Н. Кладиев // Известия Томского политехнического университета. 2011. № 319 (4). С. 93–99.
12. Paulus D., Stamper J.-F., Kennel R. Sensorless control of synchronous machines based on direct estimation of the speed and position in polar coordinates of the stator current // IEEE Transaction on Power Electronics. 2013. No. 28 (5). P. 2503–2513. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2211384
13. Воронин С.Г., Курносов Д.А., Кульмухаметова А.С. Векторное управление синхронными двигателями на постоянных магнитах // Электротехника. 2013. № 84 (10). С. 581–585.

14. Kurnosov D., Voronin S. Analysis of the phase control of synchronous electric motor with permanent magnets // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076309
15. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока с транзисторным коммутатором. Л.: Наука, 1979. 270 с.
16. Калачёв Ю.Н. Синхронные двигатели с постоянными магнитами на роторе: (управление синусоида или трапеция) // Хабр [Электронный ресурс]. <https://habr.com/ru/post/539542/?ysclid=15kw7i0tsc873417389> (дата обращения: 11.08.2022).
17. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Электромеханика». М.: Высш. шк., 1988. 479 с.
18. Воронин С.Г., Лифанов В.А., Шумихин Б.Г. Исследование пульсаций момента тихоходных бесконтактных двигателей постоянного тока с дискретным датчиком положения ротора // Электричество. 1977. № 10. С. 54–58.
19. Лифанов В.А., Воронин С.Г. Анализ энергетических показателей бесконтактных двигателей постоянного тока // Сборник научных трудов ЧПИ «Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей». Челябинск, 1973. № 124. С. 4–9.
20. Гялян Э.Т., Гнетова Д.А. Токи обмоток якоря и возбуждения при установившихся электромагнитных процессах ДПТ с вентильно-механической коммутацией // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 6. С. 7–12. DOI: 10.17213/0136-3360-2016-6-7-12

References

1. Berbirenkov I.A., Lokhnin V.V. [Traction motors on permanent magnets in the electric drive of an electric vehicle. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university*. 2011;4(318):148–150 (In Russ.)
2. Gromysheva, A.D., Ovchinnikov I.E., Egorov A.V. [Control of the speed and torque of the valve motor in the vehicle drive]. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University ITMO*. 2011;3(73):43–52. (In Russ.)
3. Refki A., Karakulov A.S., Dementiev Yu.N., Kladiyev S.N. [Microprocessor system of direct torque control of electric drives based on a synchronous motor with permanent magnets]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2011;6:62–66 (In Russ.)
4. Sizyakin A., Rummyantsev M. [Control of valve electric motors based on the iMotion system of the international rectifier company] *Power electronics*. 2012;2(35):38–43. (In Russ.)
5. Campbell-Kelly M., Croarken M., Flood R.G. The History of Mathematical Tables from Sumer to Spreadsheets. Oxford: Oxford University Press; 2003. DOI: 10.1086/491481
6. Vinogradov A.B. *Vektornoye upravleniye elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC electric drives]. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University Publ.; 2008. 298 p. (In Russ.)
7. Kalachev Yu.N. *Vektornoye regulirovaniye (zametki praktika): metod. posobiye* [Vector regulation (notes of practice): Methodical manual]. Moscow: EFO; 2013. 63 p. (In Russ.)
8. Pozdeev A.S., Kazakbayev V.M., Prakhit V.A., Dmitrievsky V.A. [Modern types of synchronous AC motors with permanent magnets on the rotor and methods of controlling them]. In: *Energy and resource saving. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources*. Ekaterinburg: UrFU; 2015. Vol. 1. P. 188–192. (In Russ.)
9. *Vektornoe upravlenie dvigatelem* [Vector motor control]. *Engineering solutions [Electronic resource]*. Available at: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector> (accessed 11.08.2022). (In Russ.)
10. *Sinkhronnyy dvigatel' s postoyannymi magnitami* [Synchronous motor with permanent magnets]. *Engineering solutions [Electronic resource]*. Available at: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm> (accessed 11.08.2022). (In Russ.)
11. Refki. A., Karakulov A.S., Dementiev Yu.N., Kladiyev S.N. [Comparative analysis of vector control and direct torque control of a synchronous electric motor with permanent magnets them]. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university*. 2011;319(4):93–99. (In Russ.)
12. Paulus D., Stamper J.-F., Kennel R. Sensorless control of synchronous machines based on direct estimation of the speed and position in polar coordinates of the stator current. *IEEE Transaction on Power Electronics*. 2013;28(5):2503–2513. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2211384
13. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kulmukhametova A.S. [Vector control of synchronous motors on permanent magnets]. *Russian Electrical Engineering*. 2013;84(10):581–585. DOI: 10.3103/S106837121310012X
14. Kurnosov D., Voronin S. Analysis of the phase control of synchronous electric motor with permanent magnets. In: *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*; 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076309
15. Ovchinnikov I.E., Lebedev N.I. *Beskontaktnyye dvigateli postoyannogo toka s tranzistornym kommutatorom* [Contactless DC motors with a transistor switch]. Leningrad: Nauka; 1979. 270 p. (In Russ.)

16. Kalachev Yu.N. *Sinkhronnyye dvigateli s postoyannymi magnitami na rotore: upravleniye (sinus i/ili trapetsiya)* [Synchronous motors with permanent magnets on the rotor: control (sine and/or trapezoid)]. *Habr [Electronic resource]*. Available at: <https://habr.com/ru/post/539542/?ysclid=15kw7i0tsc873417389> (accessed 11.08.2022).

17. Yuferov F.M. *Elektricheskiye mashiny avtomaticheskikh ustroystv: ucheb. dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spets. "Elektromekhanika"* [Electric machines of automatic devices: Textbook for university students studying in spec. "Electromechanics"]. Moscow: Vysshaya shkola; 1988. 479 p. (In Russ.)

18. Voronin S.G., Lifanov V.A., Shumikhin B.G. [Investigation of moment pulsations of low-speed contactless DC motors with a specific rotor position sensor]. *Elektrichestvo*. 1977;(10): 54–58 (In Russ.)

19. Lifanov V.A., Voronin S.G. [Analysis of energy indicators of contactless DC motors]. In: *Collection of scientific papers of CHPI No. 124. "Research of automated electric drives, electric machines and valve converters"*. Chelyabinsk; 1973. No. 124. P. 4–9 (In Russ.)

20. Galyan E.T., Gnetova D.A. Currents anchor windings and excitation by electromagnetic processes established by the PTA with gate-mechanical switching. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian electromechanics*. 2016;(6):7–12. DOI: 10.17213/0136-3360-2016-6-7-12

Информация об авторах

Воронин Сергей Григорьевич, д-р техн. наук, проф., старший научный сотрудник Управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; voroninsg@susu.ru.

Курносоев Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доц., преподаватель кафедры летательных аппаратов, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kurnosovda@susu.ru.

Клиначев Николай Васильевич, канд. техн. наук, доц., преподаватель кафедры летательных аппаратов, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; klinachevvn@susu.ru.

Кулёва Надежда Юрьевна, младший научный сотрудник Управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kulevani@susu.ru.

Information about the authors

Sergey G. Voronin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Senior Researcher of the Department of Scientific Innovation, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; voroninsg@susu.ru.

Dmitriy A. Kurnosov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Lecturer of the Department of Aircraft, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kurnosovda@susu.ru.

Nikolay V. Klinachev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Lecturer of the Department of Aircraft, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; klinachevvn@susu.ru.

Nadezhda Yu. Kuleva, Junior Researcher of the Department of Scientific Innovation, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kulevani@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 11.08.2022; одобрена после рецензирования 20.08.2022; принята к публикации 20.08.2022

The article was submitted 11.08.2022; approved after reviewing 20.08.2022; accepted for publication 20.08.2022.