

ter-Turn Winding Faults. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 260–272.

11. Kazakov, Yu.B., Morozov, A.N., Okeanskiy A.P. Diagnostika elektromagnitnykh nesimmetriy po vneshnemu polyu elektricheskikh mashin [Diagnostics of electromagnetic unbalance by measuring the external fields of electric motors]. *Materialy V Vserossiyskoy nauchno-*

*tekhnicheskoy konferentsii «Problemy elektrotekhniki, elektroenergetiki i elektrotekhnologiy» (PEEE-2017)* [Proceedings of the V All-Russia scientific and technical conference «Problems of electric engineering, electric power engineering and electric technologies»]. Tol'yatti: Izdatel'stvo TGU, 2017, pp. 376–380.

*Казаков Юрий Борисович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики, телефон (4932) 26-97-06.

*Kazakov Yuri Borisovich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral Degree), Professor, Head of the Electromechanics Department, tel. (4932) 26-97-06.

*Морозов Александр Николаевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, телефон (4932) 26-97-06.

*Morozov Aleksandr Nikolayevich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, tel. (4932) 26-97-06.

*Океанский Александр Петрович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант, телефон (4932) 26-97-06.

*Okeansky Aleksandr Petrovich,*

Ivanovo State Power Engineering University, student, tel. (4932) 26-97-06.

*Шумилов Егор Алексеевич,*

ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет» филиал в г. Сызрани, кандидат технических наук, доцент, телефон (8464) 98-39-58.

*Shumilov Egor Alekseyevich,*

Syzran Branch of Samara State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor tel. (8464) 98-39-58.

УДК621.313

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВИБРАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В СЕМИФАЗНОЙ МАШИНЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В.М. ТЕРЕШКИН

ФГБОУВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,

г. Уфа, Российская Федерация

E-mail: office@ugatu.su

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** При возрастании числа фаз двигателя уменьшается величина фазного тока и снижается уровень вибраций электромагнитного происхождения. Существуют работы, в которых приводится анализ спектра пространственно-временных гармоник результирующего тока четырехфазной, а также пятифазной и трехфазной обмоток. Вопрос влияния временных гармоник фазных токов симметричной семифазной обмотки на формирование пространственно-временных гармоник токов прямого и обратного следования не исследован. В связи с этим актуальным является выявление уникальных свойств семифазной обмотки, пространственно-временной спектр результирующего тока которой содержит только первую гармонику.

**Материалы и методы.** Расчет пространственно-временных гармоник результирующего тока семифазной обмотки по заданным временным гармоникам фазных токов произведен с использованием аналитического метода. Использованный аналитический подход является оригинальным и представляет собой развитие теории электрических машин. При исследовании предполагается, что воздушный зазор является равномерным. Рассмотрение вопроса при данном допущении позволяет выявить главные особенности поля в воздушном зазоре, формируемого семифазной обмоткой, по сравнению с обмотками, имеющими иное количество фаз.

**Результаты.** Рассмотрена семифазная обмотка электрической машины, а именно ее способность формировать результирующий (пространственно-временной) ток синусоидальной формы, несмотря на наличие временных гармоник фазных токов. Установлено, что нечетные временные гармоники фазных токов симметричной семифазной обмотки протекают по фазам, но не формируют пространственно-временные гармоники прямого и обратного следования, что в принципе исключает один из факторов вибраций электромагнитного происхождения. Фазные токи седьмой временной гармоники симметричной семифазной обмотки не имеют относительного временного сдвига, что исключает сам факт возможности их протекания.

**Выводы.** Установлено, что в спектре результирующего пространственно-временного тока семифазной обмотки, формирующего намагничивающую силу и поток в зазоре, отсутствуют высшие гармоники. Указанное обстоятельство может благоприятно влиять на снижение уровня вибраций электромагнитного происхождения. Особый интерес свойства семифазной обмотки могут представлять при реализации электропривода с векторным управлением.

**Ключевые слова:** семифазная обмотка двигателя, результирующий вектор тока, временные гармоники фазных токов, вибрации электромагнитного происхождения

## ANALYTICAL METHOD FOR THE EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC VIBRATIONS IN THE SEVEN-PHASE AC MOTOR

V.M. TERESHKIN

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

E-mail: office@ugatu.su

### Abstract

**Background.** It has been established that with an increase in the number of motor phases, the magnitude of the phase current and the level of vibrations of electromagnetic origin decrease. There are works that provide an analysis of the spectrum of the space-time harmonics of the resulting current of a four-phase winding, as well as five-phase and three-phase windings. However, the problem of studying the effect of time harmonics of phase currents of the symmetric seven-phase winding on the formation of space-time harmonics has not been studied yet. The aim of the work is to identify the unique properties of the seven-phase winding, in which the space-time spectrum of the resulting current contains only the first harmonic.

**Materials and method.** We used an analytical method for calculating the space-time harmonics of the resulting current of a seven-phase winding for given time phase harmonics. The analytical approach used is original and represents a development of the theory of electric machines. The study assumes that the air gap is uniform. Considering this question with this assumption makes it possible to reveal the main features of the field in the air gap formed by the seven-phase winding as compared with the windings having a different number of phases.

**Results.** The seven-phase winding of the electric machine is considered, namely, its ability to form a resultant (space-time) sinusoidal current, despite the presence of time harmonics of phase currents. It has been established that the odd time harmonics of the phase currents of the symmetrical seven-phase winding do flow in phases but do not form space-time harmonics of the forward and reverse sequence, which completely excludes one of the factors of vibrations of electromagnetic origin. The phase currents of the seventh time harmonic of the symmetric seven-phase winding do not have a relative time shift, which excludes the very fact that they can flow.

**Conclusions.** It has been established that there are no higher harmonics in the spectrum of the resulting space-time current of the seven-phase winding that forms the magnetizing force and the flow in the gap. This circumstance may have a favourable effect on the decrease in the level of vibrations of electromagnetic origin. The properties of the seven-phase winding may be of particular interest in the implementation of the electric drive with vector control.

**Key words:** seven-phase motor winding, resultant current vector, time harmonics of phase currents, vibration of electromagnetic origin

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.061-069

**Введение.** В настоящее время электропривод на основе многофазных машин рассматривается как альтернатива трехфазному электроприводу, что подтверждается значительным количеством исследований, проводимых в данном направлении. Особое внимание этому вопросу уделяют при создании электромобилей, гибридных силовых установок и тягового электропривода с использованием топливных элементов. Топливные элементы рассматриваются как перспективные

источники электроэнергии для применения на водном транспорте [1–3].

В [4–12] и других работах зарубежных авторов рассмотрены вопросы влияния количества фаз электродвигателя на снижение величины номинального фазного тока, повышение надежности и снижение уровня шума и вибраций.

Значительное место в исследовании многофазных машин с пониженным уровнем вибраций занимают работы [13–15], которые

ориентированы на применение этих машин в текстильной промышленности.

В [16–18] рассматриваются вопросы вибраций машин в электроприводах с векторным управлением.

Одна из причин вибраций электромагнитного происхождения – это наличие высших временных гармоник фазного тока, которые формируют пространственно-временные составляющие спектра результирующего тока. Известно, что симметричная трехфазная обмотка формирует токи прямой и обратной последовательности по 5, 7, 11 гармоникам, причем 5-ю и 11-ю – пространственно-временные гармоники тока обратного следования, 7-ю – пространственно-временную гармонику прямого следования, что способствует электромагнитным вибрациям. Временные и пространственно-временные гармоники, кратные трем, отсутствуют в спектре фазных токов и результирующего тока [19].

В [20] исследован гармонический состав результирующего пространственно-временного тока четырехфазной симметричной обмотки электрической машины.

В [21] исследован гармонический состав результирующего пространственно-временного тока пятифазной симметричной обмотки электрической машины. 9-я временная гармоника фазного тока является гармоникой обратного следования, а 11-я временная гармоника фазного тока является гармоникой прямого следования. Они формируют пространственно-временные гармоники и создают вращающиеся поля обратного и прямого следования соответственно и могут создавать электромагнитные вибрации. 3-я и 7-я временные гармоники фазных токов не формируют пространственно-временных векторов, а 5-я временная гармоника отсутствует.

Вопрос влияния временных гармоник фазных токов симметричной семифазной обмотки на формирование пространственно-временных гармоник токов прямого и обратного следования не исследован.

Ниже предлагается исследование формирования пространственно-временных гармоник (спектра результирующего тока) симметричной семифазной обмотки временными гармониками фазных токов.

**Методы исследования.** Исследование проведено с использованием аналитического метода определения амплитуд результирующего вектора тока семифазной обмотки. При исследовании предполагалось, что воздушный зазор является равномерным, т.е. пазы отсутствуют. Рассмотрение вопроса при данном допущении позволяет выявить главные особенности поля в воздушном зазоре, формируемого семифазной обмоткой, по сравнению с обмотками, имеющими иное количество фаз.

Гармонический состав фазных токов (временной спектр) семифазной обмотки аналитически может быть представлен в следующем виде:

$$i_A = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin(n \times \omega t - 0),$$

$$i_B = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin\left(n \times \omega t - n \times \frac{2\pi}{7}\right),$$

$$i_C = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin\left(n \times \omega t - n \times \frac{4\pi}{7}\right),$$

$$i_D = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin\left(n \times \omega t - n \times \frac{6\pi}{7}\right),$$

$$i_E = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin\left(n \times \omega t - n \times \frac{8\pi}{7}\right),$$

$$i_F = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin\left(n \times \omega t - n \times \frac{10\pi}{7}\right),$$

$$i_G = \sum_{n=1,3,5...} I_{mn} \sin\left(n \times \omega t - n \times \frac{12\pi}{7}\right).$$

На рис. 1 представлена схема симметричной семифазной обмотки, которая имеет следующие параметры:

$$p = 2, q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{28}{2 \times 2 \times 7} = 1.$$

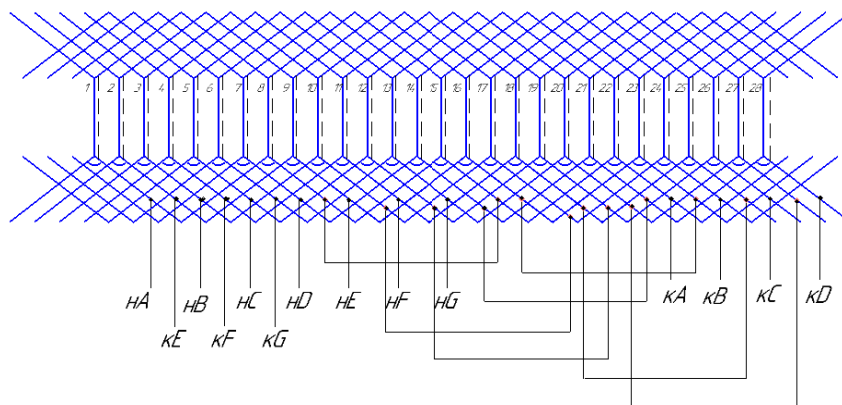


Рис. 1. Схема симметричной семифазной обмотки

На рис. 2 представлены гармонические составляющие фазных токов семифазной обмотки (нагрузка симметричная), а на рис. 3 в векторной форме представлена симметричная семифазная обмотка, в фазах которой протекают токи, обозначенные векторами. На рис. 3 изображен процесс формирования результирующего вектора тока 1-й гармоники в момент, когда  $\omega t = 90^\circ$ .

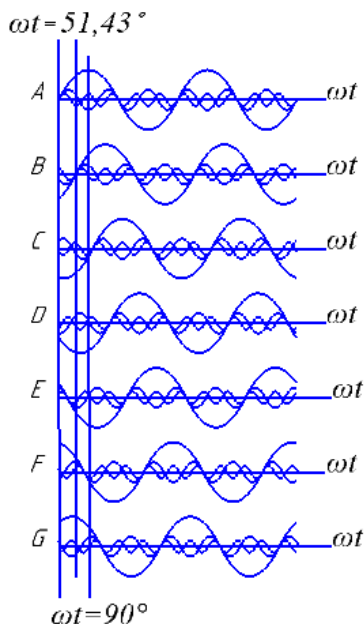


Рис. 2. Гармонические составляющие токов семифазной обмотки

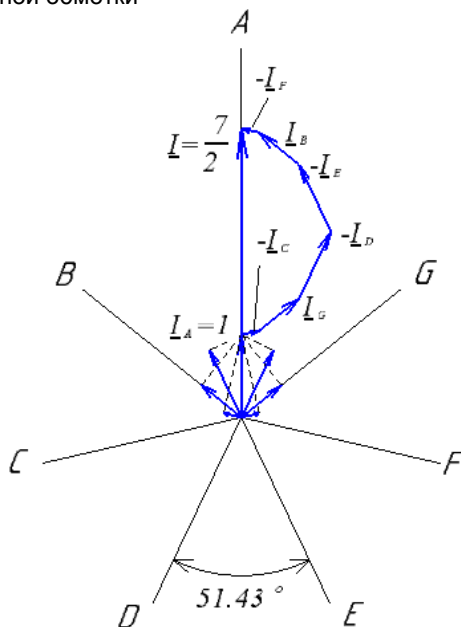


Рис. 3. Формирование результирующего вектора тока 1-й гармоники симметричной семифазной обмоткой

Если предположить, что амплитуда первой гармоники фазного тока равна единице, то

величины векторов фазных токов в момент времени  $\omega t = 90^\circ$  соответственно равны:

$$I_A = 1, \quad I_B = I_G = \cos 51,43^\circ, \\ I_C = I_F = \cos 77,143^\circ, \quad I_D = I_E = \cos 25,72^\circ.$$

С учетом пространственного сдвига фаз (угол пространственного сдвига между соседними фазами равен  $51,43^\circ$  эл) амплитуда результирующего вектора тока  $I$  равна

$$|I| = 1 + 2 \cdot (\cos 25,72^\circ)^2 + 2 \cdot (\cos 51,43^\circ)^2 + \\ + 2 \cdot (\cos 77,143^\circ)^2 = \frac{7}{2} = 3,5,$$

что справедливо, так как обмотка семифазная.

**Расчет амплитуд гармоник результирующих пространственно-временных токов.**

Проведем расчет результирующего пространственно-временного тока по 1, 3, 5, 7, 9, 11 гармоникам, предполагая амплитуду каждой из временных гармоник фазного тока равной единице. Расчеты проводим относительно фазы А.

Результирующий вектор тока 1-й гармоники семифазной обмотки (рис. 2, 3) определяется следующим образом:

$$I_1 = \sin \omega t + \cos \frac{2\pi}{7} \cdot \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{7} \right) + \\ + \cos \frac{4\pi}{7} \cdot \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{7} \right) + \cos \frac{6\pi}{7} \cdot \sin \left( \omega t - \frac{6\pi}{7} \right) + \\ + \cos \frac{8\pi}{7} \cdot \sin \left( \omega t - \frac{8\pi}{7} \right) + \cos \frac{10\pi}{7} \cdot \sin \left( \omega t - \frac{10\pi}{7} \right) + \\ + \cos \frac{12\pi}{7} \cdot \sin \left( \omega t - \frac{12\pi}{7} \right) = \sin \omega t + \\ + \cos \frac{2\pi}{7} \left[ \sin \omega t \cdot \cos \frac{2\pi}{7} - \cos \omega t \cdot \sin \frac{2\pi}{7} \right] + \\ + \cos \frac{4\pi}{7} \left[ \sin \omega t \cdot \cos \frac{4\pi}{7} - \cos \omega t \cdot \sin \frac{4\pi}{7} \right] + \\ + \cos \frac{6\pi}{7} \left[ \sin \omega t \cdot \cos \frac{6\pi}{7} - \cos \omega t \cdot \sin \frac{6\pi}{7} \right] + \\ + \cos \frac{8\pi}{7} \left[ \sin \omega t \cdot \cos \frac{8\pi}{7} - \cos \omega t \cdot \sin \frac{8\pi}{7} \right] + \\ + \cos \frac{10\pi}{7} \left[ \sin \omega t \cdot \cos \frac{10\pi}{7} - \cos \omega t \cdot \sin \frac{10\pi}{7} \right] + \\ + \cos \frac{12\pi}{7} \left[ \sin \omega t \cdot \cos \frac{12\pi}{7} - \cos \omega t \cdot \sin \frac{12\pi}{7} \right] = \\ = \sin \omega t + 0,3888 \cdot \sin \omega t - 0,4875 \cdot \cos \omega t + \\ + 0,0495 \cdot \sin \omega t + 0,2169 \cdot \cos \omega t + 0,8118 \cdot \sin \omega t + \\ + 0,3909 \cdot \cos \omega t + 0,8118 \cdot \sin \omega t - \\ - 0,3909 \cdot \cos \omega t + 0,0495 \cdot \sin \omega t - 0,2169 \cdot \cos \omega t + \\ + 0,3888 \cdot \sin \omega t + 0,4875 \cdot \cos \omega t = 3,5 \cdot \sin \omega t.$$

Амплитуда результирующего тока в 3,5 раза больше амплитуды фазного тока, что

справедливо, так как обмотка семифазная. Первая гармоника результирующего тока является гармоникой прямого следования, что следует из временной последовательности чередования фазных токов:

$$0^\circ, \frac{2\pi}{7} = 51,4286^\circ, \frac{4\pi}{7} = 102,852^\circ,$$

$$\frac{6\pi}{7} = 154,2857^\circ, \frac{8\pi}{7} = 205,7143^\circ,$$

$$\frac{10\pi}{7} = 257,1429^\circ, \frac{12\pi}{7} = 308,5714^\circ.$$

Результирующий вектор тока 3-й гармоники семифазной обмотки (рис. 2, 3) определяется как

$$\begin{aligned} I_3 &= \sin 3 \cdot \omega t + \cos \frac{2\pi}{7} \cdot \sin \left( 3 \cdot \omega t - 3 \cdot \frac{2\pi}{7} \right) + \\ &+ \cos \frac{4\pi}{7} \cdot \sin \left( 3 \cdot \omega t - 3 \cdot \frac{4\pi}{7} \right) + \cos \frac{6\pi}{7} \cdot \sin \left( 3 \cdot \omega t - 3 \cdot \frac{6\pi}{7} \right) + \\ &+ \cos \frac{8\pi}{7} \cdot \sin \left( 3 \cdot \omega t - 3 \cdot \frac{8\pi}{7} \right) + \\ &+ \cos \frac{10\pi}{7} \cdot \sin \left( 3 \cdot \omega t - 3 \cdot \frac{10\pi}{7} \right) + \\ &+ \cos \frac{12\pi}{7} \cdot \sin \left( 3 \cdot \omega t - 3 \cdot \frac{12\pi}{7} \right) = \sin 3 \cdot \omega t + \\ &+ \cos \frac{2\pi}{7} \left[ \sin 3 \cdot \omega t \cdot \cos 3 \cdot \frac{2\pi}{7} - \cos 3 \cdot \omega t \cdot \sin 3 \cdot \frac{2\pi}{7} \right] + \\ &+ \cos \frac{4\pi}{7} \left[ \sin 3 \cdot \omega t \cdot \cos 3 \cdot \frac{4\pi}{7} - \cos 3 \cdot \omega t \cdot \sin 3 \cdot \frac{4\pi}{7} \right] + \\ &+ \cos \frac{6\pi}{7} \left[ \sin 3 \cdot \omega t \cdot \cos 3 \cdot \frac{6\pi}{7} - \cos 3 \cdot \omega t \cdot \sin 3 \cdot \frac{6\pi}{7} \right] + \\ &+ \cos \frac{8\pi}{7} \left[ \sin 3 \cdot \omega t \cdot \cos 3 \cdot \frac{8\pi}{7} - \cos 3 \cdot \omega t \cdot \sin 3 \cdot \frac{8\pi}{7} \right] + \\ &+ \cos \frac{10\pi}{7} \left[ \sin 3 \cdot \omega t \cdot \cos 3 \cdot \frac{10\pi}{7} - \cos 3 \cdot \omega t \cdot \sin 3 \cdot \frac{10\pi}{7} \right] + \\ &+ \cos \frac{12\pi}{7} \left[ \sin 3 \cdot \omega t \cdot \cos 3 \cdot \frac{12\pi}{7} - \cos 3 \cdot \omega t \cdot \sin 3 \cdot \frac{12\pi}{7} \right] = \\ &= \sin 3 \cdot \omega t - 0,5618 \cdot \sin 3 \cdot \omega t - 0,2705 \cdot \cos 3 \cdot \omega t - \\ &- 0,1387 \cdot \sin 3 \cdot \omega t - 0,174 \cdot \cos 3 \cdot \omega t + \\ &+ 0,2005 \cdot \sin 3 \cdot \omega t + 0,8784 \cdot \cos 3 \cdot \omega t + \\ &+ 0,2005 \cdot \sin 3 \cdot \omega t - 0,8784 \cdot \cos 3 \cdot \omega t - \\ &- 0,1387 \cdot \sin 3 \cdot \omega t + 0,174 \cdot \cos 3 \cdot \omega t - \\ &- 0,5618 \cdot \sin 3 \cdot \omega t + 0,2705 \cdot \cos 3 \cdot \omega t = 0. \end{aligned}$$

$$\frac{6\pi}{7} = 154,2857^\circ, \frac{12\pi}{7} = 308,5714^\circ,$$

$$\frac{18\pi}{7} = 462,8572^\circ, \frac{24\pi}{7} = 617,1429^\circ,$$

$$\frac{30\pi}{7} = 771,4286^\circ, \frac{36\pi}{7} = 925,7143^\circ.$$

Для определения временной последовательности чередования фазных токов по 3-й гармонике проведем расчеты:

A – 0

B –  $154,2857/360 = 0,4257$  оборота

$0,4257 \cdot 360 = 154,2857$

C –  $308,5714/360 = 0,8572$

$0,8572 \cdot 360 = 308,5714$

D –  $462,8572/360 = 1,2857$

$1,2857 - 1 = 0,2857 \cdot 360 = 102,852$

E –  $617,1429/360 = 1,7143$

$1,7143 - 1 = 0,7143 \cdot 360 = 257,148$

F –  $771,4286/360 = 2,1429$

$2,1429 - 2 = 0,1429 \cdot 360 = 51,4286$

G –  $925,7143/360 = 2,5714$

$2,5714 - 2 = 0,5714 \cdot 360 = 205,7143$

По фазам ABCDEFG семифазной обмотки протекают токи 3-й гармоники с временным чередованием фаз AFDBGEC. При этом вращающееся поле не формируется, так как результирующий вектор тока равен нулю.

Результирующий вектор тока 5-й гармоники семифазной обмотки (рис. 2, 3) определяется как

$$\begin{aligned} I_5 &= \sin 5\omega t + \cos \frac{2\pi}{7} \cdot \sin \left( 5\omega t - 5 \cdot \frac{2\pi}{7} \right) + \\ &+ \cos \frac{4\pi}{7} \cdot \sin \left( 5\omega t - 5 \cdot \frac{4\pi}{7} \right) + \cos \frac{6\pi}{7} \cdot \sin \left( 5\omega t - 5 \cdot \frac{6\pi}{7} \right) + \\ &+ \cos \frac{8\pi}{7} \cdot \sin \left( 5\omega t - 5 \cdot \frac{8\pi}{7} \right) + \\ &+ \cos \frac{10\pi}{7} \cdot \sin \left( 5\omega t - 5 \cdot \frac{10\pi}{7} \right) + \\ &+ \cos \frac{12\pi}{7} \cdot \sin \left( 5\omega t - 5 \cdot \frac{12\pi}{7} \right) = \sin 5\omega t + \\ &+ \cos \frac{2\pi}{7} \left[ \sin 5\omega t \cdot \cos 5 \cdot \frac{2\pi}{7} - \cos 5\omega t \cdot \sin 5 \cdot \frac{2\pi}{7} \right] + \\ &+ \cos \frac{4\pi}{7} \left[ \sin 5\omega t \cdot \cos 5 \cdot \frac{4\pi}{7} - \cos 5\omega t \cdot \sin 5 \cdot \frac{4\pi}{7} \right] + \\ &+ \cos \frac{6\pi}{7} \left[ \sin 5\omega t \cdot \cos 5 \cdot \frac{6\pi}{7} - \cos 5\omega t \cdot \sin 5 \cdot \frac{6\pi}{7} \right] + \\ &+ \cos \frac{8\pi}{7} \left[ \sin 5\omega t \cdot \cos 5 \cdot \frac{8\pi}{7} - \cos 5\omega t \cdot \sin 5 \cdot \frac{8\pi}{7} \right] + \\ &+ \cos \frac{10\pi}{7} \left[ \sin 5\omega t \cdot \cos 5 \cdot \frac{10\pi}{7} - \cos 5\omega t \cdot \sin 5 \cdot \frac{10\pi}{7} \right] + \\ &+ \cos \frac{12\pi}{7} \left[ \sin 5\omega t \cdot \cos 5 \cdot \frac{12\pi}{7} - \cos 5\omega t \cdot \sin 5 \cdot \frac{12\pi}{7} \right] = \\ &= \sin 5\omega t - 0,1387 \cdot \sin 5\omega t + 0,6079 \cdot \cos 5\omega t + \\ &+ 0,2005 \cdot \sin 5\omega t + 0,0966 \cdot \cos 5\omega t - \\ &- 0,5618 \cdot \sin 5\omega t + 0,7044 \cdot \cos 5\omega t - 0,5618 \cdot \sin 5\omega t - \\ &- 0,7044 \cdot \cos 5\omega t + 0,2005 \cdot \sin 5\omega t - 0,0966 \cdot \cos 5\omega t - \\ &- 0,1387 \cdot \sin 5\omega t - 0,6079 \cdot \cos 5\omega t = 0. \end{aligned}$$

Для определения временной последовательности чередования фазных токов по 5-й гармонике проведем расчеты:

A – 0

B –  $257,1429/360 = 0,7143$  оборота

$0,7143 \cdot 360 = 257,1429$

C –  $514,2857/360 = 1,4286$

$(1,4286 - 1) \cdot 360 = 154,296$

D –  $771,4286/360 = 2,1429$

$(2,1429 - 2) \cdot 360 = 51,4286$

E –  $1028,5714/360 = 2,8571$

$(2,8571 - 2) \cdot 360 = 308,5714$

F –  $1285,7143/360 = 3,5714$

$(3,5714 - 3) \cdot 360 = 205,7143$

G –  $1542,8571/360 = 4,2857$

$(4,2857 - 4) \cdot 360 = 102,8571$

По фазам ABCDEFG семифазной обмотки протекают токи пятой гармоники с временным чередованием фаз ADGCFBE. При этом вращающееся поле не формируется, что следует из расчетов (результатирующий вектор равен нулю).

Результатирующий вектор тока 7-й гармоники семифазной обмотки (рис. 2, 3) определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 I_7 &= \sin 7\omega t + \cos \frac{2\pi}{7} \cdot \sin \left( 7\omega t - 7 \cdot \frac{2\pi}{7} \right) + \\
 &+ \cos \frac{4\pi}{7} \cdot \sin \left( 7\omega t - 7 \cdot \frac{4\pi}{7} \right) + \cos \frac{6\pi}{7} \cdot \sin \left( 7\omega t - 7 \cdot \frac{6\pi}{7} \right) + \\
 &+ \cos \frac{8\pi}{7} \cdot \sin \left( 7\omega t - 7 \cdot \frac{8\pi}{7} \right) + \cos \frac{10\pi}{7} \cdot \sin \left( 7\omega t - 7 \cdot \frac{10\pi}{7} \right) + \\
 &+ \cos \frac{12\pi}{7} \cdot \sin \left( 7\omega t - 7 \cdot \frac{12\pi}{7} \right) = \sin 7\omega t + \\
 &+ \cos \frac{2\pi}{7} \left[ \sin 7\omega t \cdot \cos 7 \frac{2\pi}{7} - \cos 7\omega t \cdot \sin 7 \frac{2\pi}{7} \right] + \\
 &+ \cos \frac{4\pi}{7} \left[ \sin 7\omega t \cdot \cos 7 \frac{4\pi}{7} - \cos 7\omega t \cdot \sin 7 \frac{4\pi}{7} \right] + \\
 &+ \cos \frac{6\pi}{7} \left[ \sin 7\omega t \cdot \cos 7 \frac{6\pi}{7} - \cos 7\omega t \cdot \sin 7 \frac{6\pi}{7} \right] + \\
 &+ \cos \frac{8\pi}{7} \left[ \sin 7\omega t \cdot \cos 7 \frac{8\pi}{7} - \cos 7\omega t \cdot \sin 7 \frac{8\pi}{7} \right] + \\
 &+ \cos \frac{10\pi}{7} \left[ \sin 7\omega t \cdot \cos 7 \frac{10\pi}{7} - \cos 7\omega t \cdot \sin 7 \frac{10\pi}{7} \right] + \\
 &+ \cos \frac{12\pi}{7} \left[ \sin 7\omega t \cdot \cos 7 \frac{12\pi}{7} - \cos 7\omega t \cdot \sin 7 \frac{12\pi}{7} \right] = \\
 &= \sin 7\omega t + 0,6235 \cdot \sin 7\omega t + 0 \cdot \cos 7\omega t - \\
 &- 0,2225 \cdot \sin 7\omega t + 0 \cdot \cos 7\omega t - 0,901 \cdot \sin 7\omega t + \\
 &+ 0 \cdot \cos 7\omega t - 0,901 \cdot \sin 7\omega t - 0 \cdot \cos 7\omega t - \\
 &- 0,2225 \cdot \sin 7\omega t - 0 \cdot \cos 7\omega t + 0,6235 \cdot \sin 7\omega t - \\
 &- 0 \cdot \cos 7\omega t = 0.
 \end{aligned}$$

Токи фаз семифазной обмотки ABCDEFG по 7-й гармонике не имеют временного сдвига, а следовательно, при симметричном режиме не могут протекать по семифазной обмотке. Пространственно-временная компонента 7-й гармоники тока отсутствует, намагничивающая сила по 7-й гармонике не формируется. Причем, как бы не искажалась форма фазного тока семифазной симметричной нагрузки, например под воздействием реакции якоря, эта форма никогда не будет содержать 7-ю временную гармонику, а следовательно, не будет формироваться намагничивающая сила 7-й гармоники.

Результатирующий вектор тока 9-й гармоники семифазной обмотки (рис. 2, 3) определяется как

$$\begin{aligned}
 I_9 &= \sin 9\omega t + \cos \frac{2\pi}{7} \cdot \sin \left( 9\omega t - 9 \cdot \frac{2\pi}{7} \right) + \\
 &+ \cos \frac{4\pi}{7} \cdot \sin \left( 9\omega t - 9 \cdot \frac{4\pi}{7} \right) + \\
 &+ \cos \frac{6\pi}{7} \cdot \sin \left( 9\omega t - 9 \cdot \frac{6\pi}{7} \right) + \\
 &+ \cos \frac{8\pi}{7} \cdot \sin \left( 9\omega t - 9 \cdot \frac{8\pi}{7} \right) + \\
 &+ \cos \frac{10\pi}{7} \cdot \sin \left( 9\omega t - 9 \cdot \frac{10\pi}{7} \right) + \\
 &+ \cos \frac{12\pi}{7} \cdot \sin \left( 9\omega t - 9 \cdot \frac{12\pi}{7} \right) = \sin 9\omega t + \\
 &+ \cos \frac{2\pi}{7} \left[ \sin 9\omega t \cdot \cos 9 \frac{2\pi}{7} - \cos 9\omega t \cdot \sin 9 \frac{2\pi}{7} \right] + \\
 &+ \cos \frac{4\pi}{7} \left[ \sin 9\omega t \cdot \cos 9 \frac{4\pi}{7} - \cos 9\omega t \cdot \sin 9 \frac{4\pi}{7} \right] + \\
 &+ \cos \frac{6\pi}{7} \left[ \sin 9\omega t \cdot \cos 9 \frac{6\pi}{7} - \cos 9\omega t \cdot \sin 9 \frac{6\pi}{7} \right] + \\
 &+ \cos \frac{8\pi}{7} \left[ \sin 9\omega t \cdot \cos 9 \frac{8\pi}{7} - \cos 9\omega t \cdot \sin 9 \frac{8\pi}{7} \right] + \\
 &+ \cos \frac{10\pi}{7} \left[ \sin 9\omega t \cdot \cos 9 \frac{10\pi}{7} - \cos 9\omega t \cdot \sin 9 \frac{10\pi}{7} \right] + \\
 &+ \cos \frac{12\pi}{7} \left[ \sin 9\omega t \cdot \cos 9 \frac{12\pi}{7} - \cos 9\omega t \cdot \sin 9 \frac{12\pi}{7} \right] = \\
 &= \sin 9\omega t - 0,1387 \cdot \sin 9\omega t - 0,6079 \cdot \cos 9\omega t + \\
 &+ 0,2005 \cdot \sin 9\omega t - 0,0966 \cdot \cos 9\omega t - \\
 &- 0,5618 \cdot \sin 9\omega t - 0,7044 \cdot \cos 9\omega t - \\
 &- 0,5618 \cdot \sin 9\omega t + 0,7044 \cdot \cos 9\omega t + \\
 &+ 0,2005 \cdot \sin 9\omega t + 0,0966 \cdot \cos 9\omega t - \\
 &- 0,1387 \cdot \sin 9\omega t + 0,6088 \cdot \cos 9\omega t = 0.
 \end{aligned}$$

Для определения временной последовательности чередования фазных токов по 9-й гармонике проведем расчеты:

A – 0

B – 462,8572/360 = 1,2857 оборота

(1,2857 – 1) · 360 = **102,852**

C – 925,7143/360 = 2,5714

(2,5714 – 2) · 360 = **205,7143**

D – 1388,5714/360 = 3,8572

(3,8572 – 3) · 360 = **308,5714**

E – 1851,4286/360 = 5,1429

(5,1429 – 5) · 360 = **51,444**

F – 2314,2857/360 = 6,4286

(6,4286 – 6) · 360 = **154,2857**

G – 2777,1429/360 = 7,7142

(7,7142 – 7) · 360 = **257,1429**

По фазам ABCDEFG семифазной обмотки протекают токи 9-й гармоники с временным чередованием фаз AEBFCGD. При этом вращающееся поле также не формируется.

Результирующий вектор тока 11-й гармоники семифазной обмотки (рис. 2, 3) определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 I_{11} = & \sin 11\omega t + \cos \frac{2\pi}{7} \cdot \sin \left( 11\omega t - 11 \cdot \frac{2\pi}{7} \right) + \\
 & + \cos \frac{4\pi}{7} \cdot \sin \left( 11\omega t - 11 \cdot \frac{4\pi}{7} \right) + \\
 & + \cos \frac{6\pi}{7} \cdot \sin \left( 11\omega t - 11 \cdot \frac{6\pi}{7} \right) + \\
 & + \cos \frac{8\pi}{7} \cdot \sin \left( 11\omega t - 11 \cdot \frac{8\pi}{7} \right) + \\
 & + \cos \frac{10\pi}{7} \cdot \sin \left( 11\omega t - 11 \cdot \frac{10\pi}{7} \right) + \\
 & + \cos \frac{12\pi}{7} \cdot \sin \left( 11\omega t - 11 \cdot \frac{12\pi}{7} \right) = \sin 11\omega t + \\
 & + \cos \frac{2\pi}{7} \left[ \sin 11\omega t \cdot \cos 11 \frac{2\pi}{7} - \cos 11\omega t \cdot \sin 11 \frac{2\pi}{7} \right] + \\
 & + \cos \frac{4\pi}{7} \left[ \sin 11\omega t \cdot \cos 11 \frac{4\pi}{7} - \cos 11\omega t \cdot \sin 11 \frac{4\pi}{7} \right] + \\
 & + \cos \frac{6\pi}{7} \left[ \sin 11\omega t \cdot \cos 11 \frac{6\pi}{7} - \cos 11\omega t \cdot \sin 11 \frac{6\pi}{7} \right] + \\
 & + \cos \frac{8\pi}{7} \left[ \sin 11\omega t \cdot \cos 11 \frac{8\pi}{7} - \cos 11\omega t \cdot \sin 11 \frac{8\pi}{7} \right] + \\
 & + \cos \frac{10\pi}{7} \left[ \sin 11\omega t \cdot \cos 11 \frac{10\pi}{7} - \cos 11\omega t \cdot \sin 11 \frac{10\pi}{7} \right] + \\
 & + \cos \frac{12\pi}{7} \left[ \sin 11\omega t \cdot \cos 11 \frac{12\pi}{7} - \cos 11\omega t \cdot \sin 11 \frac{12\pi}{7} \right] = \\
 = & \sin 11\omega t - 0,5618 \cdot \sin 11\omega t + 0,2705 \cdot \cos 11\omega t - \\
 & - 0,1387 \cdot \sin 11\omega t + 0,174 \cdot \cos 11\omega t + \\
 & + 0,2005 \cdot \sin 11\omega t - 0,8784 \cdot \cos 11\omega t + \\
 & + 0,2005 \cdot \sin 11\omega t + 0,8784 \cdot \cos 11\omega t - \\
 & - 0,1387 \cdot \sin 11\omega t - 0,174 \cdot \cos 11\omega t - \\
 & - 0,5618 \cdot \sin 11\omega t - 0,2705 \cdot \cos 11\omega t = 0.
 \end{aligned}$$

Для определения временной последовательности чередования фазных токов по 11-й гармонике проведем расчеты:

A – 0

B – 565,7143/360 = 1,5714 оборота

(1,5714 – 1) · 360 = **205,7143**

C – 1131,4286/360 = 3,1429

(3,1429 – 3) · 360 = **51,4286**

D – 1697,1429/360 = 4,7143

(4,7143 – 4) · 360 = **257,1429**

E – 2262,8572/360 = 6,2857

(6,2857 – 6) · 360 = **102,8572**

F – 2828,5714/360 = 7,8572

(7,8572 – 7) · 360 = **308,5714**

G – 3394,2857/360 = 9,4286

(9,4286 – 9) · 360 = **154,2857**

По фазам ABCDEFG семифазной обмотки протекают токи 11-й гармоники с временным чередованием фаз ACEGBDF. При этом вращающееся поле не формируется, что следует из расчетов (результирующий вектор равен нулю).

**Результаты исследований.** Ни одна из временных гармоник фазного тока симметричной семифазной обмотки не формирует пространственно-временную составляющую прямого или обратного следования.

Полученные результаты позволяют предположить, что применение семифазной обмотки (вместо трехфазной обмотки) исключает необходимость формирования синусоидальной формы фазного тока, так как в спектре результирующего тока (пространственно-временного), формирующего намагничивающую силу и поток, отсутствуют высшие гармоники.

Высшие гармоники (временные) протекают по фазам, но «не трансформируются» в пространственно-временные составляющие результирующего тока, что позволяет предположить улучшение вибрационных свойств семифазной машины по сравнению с трехфазной.

**Выводы.** Нечетные временные гармоники (3, 5, 7, 9, 11) фазных токов симметричной семифазной обмотки не формируют пространственно-временные гармоники прямого и обратного следования, что исключает один из факторов вибраций электромагнитного происхождения.

Фазные токи 7-й временной гармоники симметричной семифазной обмотки не имеют относительного временного сдвига, что исключает сам факт возможности их протекания.

Как бы не искажалась форма фазных токов симметричной семифазной обмотки, например в результате реакции якоря, в гармоническом спектре фазных токов будет отсутствовать седьмая временная гармоника.

## Список литературы

1. **Chan C.C.** The State of the Art of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles // *Proc IEEE*. – 2007. – Vol. 95, no. 4. – P. 704–718.

2. **Chan C.C., Bouscayrol A., Chen K.** Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling // *IEEE Transact Vehicular Technol.* – 2010. – Vol. 59, no. 2. P. 589–598.

3. **Global EV Outlook: Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020**, Apr. 2013. Available at: [http://www.iea.org/publications/globalevoutlook\\_2013.pdf](http://www.iea.org/publications/globalevoutlook_2013.pdf).

4. **Multiphase Induction Motor Drives – A Technology Status Review** / E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo et al. // *IET Electric Power Applic.* – 2007. – Vol. 1, no. 4. – P. 489–516.

5. **Dwari S., Parsa L.** Fault-Tolerant Control of Five-Phase Permanent-Magnet Motors With Trapezoidal Back EMF // *IEEE Transact Indust Electron.* – 2011. – Vol. 58, no. 2. – P. 476–485.

6. **Williamson S., Smith S.** Pulsating Torque and Losses in Multiphase Induction Machines // *IEEE Transact Indust Applic.* – 2003. – Vol. 39, no. 4. – P. 986–993.

7. **Duran Mario J., Barrero F.J., Toral S.L.** Multi-Phase Space Vector Pulse Width Modulation: Applications and Strategies // *Int. Conf. on Renewable Energies and Power Quality (RE&PQJ)*, Journal. – 2007. – № 5.

8. **Multi-dimensional** space vector pulse width modulation scheme for five-phase series-connected two-motor drives / Mario J. Duran, F.J. Barrero, S.L. Toral, E. Levi // *IEEE Int. Elec. Machines and Drives Conf. (IEMDC)*, Antalya. – 2007.

9. **Levi E.** Multiphase electric machines for variable-speed applications // *IEEE Trans. Industrial Electronics*. – May 2008. – Vol. 55(5). – P. 1893–1909.

10. **Dwari S., Parsa L.** Fault-Tolerant Control of Five-Phase Permanent-Magnet Motors With Trapezoidal Back EMF // *IEEE Transact Indust Electron.* – 2011. – Vol. 58, no. 2. – P. 476–485.

11. **Williamson S., Smith S.** Pulsating Torque and Losses in Multiphase Induction Machines // *IEEE Transact Indust Applic.* – 2003. – Vol. 39, no. 4. – P. 986–993.

12. **Vieri Xue.** Center-Aligned SVPWM Realization for 3-Phase 3-Level Inverter, Application Report SPRABS6. – October, 2012.

13. **Голубев А.Н., Игнатенко С.В.** Влияние числа фаз статорной обмотки асинхронного двигателя на его виброшумовые характеристики // *Электротехника*. – 2000. – № 6. – С. 28–31.

14. **Голубев А.Н., Игнатенко С.В.** Многофазный асинхронный электропривод в аномальных режимах работы // *Электротехника*. – 2001. – № 10. – С. 17–22.

15. **Бабаев М.Б., Голубев А.Н., Игнатенко С.В.** Влияние числа фаз на пульсации момента и виброшумовые характеристики АД // II Междунар. конф. по электромеханике и электротехнологиям: тез. докл. в 2 ч. Ч. 2. – Крым, 1996. – С. 150–152.

16. **Козярук А.Е., Рудаков В.В.** Системы управления электроприводов. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока. – СПб.: СПГГИ(НИУ), 2007. – 75 с.

17. **Козярук А.Е.** Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока машин и механизмов горного производства. – СПб.: СПГГИ(НИУ), 2008. – 99 с.

18. **Усольцев А.А.** Современный асинхронный электропривод оптико-механических комплексов. – СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2011. – 164 с.

19. **Вольдек А.И.** Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974.

20. **Терешкин В.М.** Определение гармонического состава результирующего тока 4-х фазной симметричной обмотки электрической машины // *Вестник Московского авиационного института*. – 2018. – Т. 25, № 3. – С. 212–219.

21. **Терешкин В.М.** Теоретическое обоснование возможности снижения вибраций электромагнитного происхождения в пятифазной машине переменного тока по сравнению с трехфазной машиной // *Вестник Московского авиационного института*. – 2018. – Т. 25, № 4. – С. 229–239.

## References

1. Chan, C.C. The State of the Art of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles. *Proc IEEE*, 2007, vol. 95, no. 4, pp. 704–718.

2. Chan, C.C., Bouscayrol, A., Chen, K. Electric, Hybrid and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling. *IEEE Transact Vehicular Technol*, 2010, vol. 59, no. 2, pp. 589–598.

3. Global EV Outlook: Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020, Apr. 2013. Available at: [http://www.iea.org/publications/globalevoutlook\\_2013.pdf](http://www.iea.org/publications/globalevoutlook_2013.pdf).

4. Levi, E., Bojoi, R., Profumo, F., Toliyat, H.A., Williamson, S. Multiphase Induction Motor Drives – A Technology Status Review. *IET Electric Power Applic*, 2007, vol. 1, no. 4, pp. 489–516.

5. Dwari, S., Parsa, L. Fault-Tolerant Control of Five-Phase Permanent-Magnet Motors With Trapezoidal Back EMF. *IEEE Transact Indust Electron*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 476–485.

6. Williamson, S., Smith, S. Pulsating Torque and Losses in Multiphase Induction Machines. *IEEE Transact Indust Applic*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 986–993.

7. Duran, Mario J., Barrero, F.J., Toral, S.L. Multi-Phase Space Vector Pulse Width Modulation: Applications and Strategies». *Int. Conf. on Renewable Energies and Power Quality (RE&PQJ)*, 2007, Journal № 5.

8. Duran, Mario J., Barrero, F.J., Toral, S.L., Levi, E. Multi-dimensional space vector pulse width modulation scheme for five-phase series-connected two-motor drives. *IEEE Int. Elec. Machines and Drives Conf. (IEMDC)*, Antalya, 2007.

9. Levi, E. Multiphase electric machines for variable-speed applications. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, May 2008, vol. 55(5), pp. 1893–1909.

10. Dwari, S., Parsa, L. Fault-Tolerant Control of Five-Phase Permanent-Magnet Motors With Trapezoidal Back EMF. *IEEE Transact Indust Electron*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 476–485.

11. Williamson, S., Smith, S. Pulsating Torque and Losses in Multiphase Induction Machines. *IEEE Transact Indust Applic*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 986–993.



12. Vieri Xue. Center-Aligned SVPWM Realization for 3-Phase 3-Level Inverter, Application Report SPRABS6. October, 2012.

13. Golubev, A.N., Ignatenko, C.B. *Elektrotehnika*, 2000, no. 6, pp. 28–31.

14. Golubev, A.N., Ignatenko, C.B. *Elektrotehnika*, 2001, no. 10, pp. 17–22.

15. Babaev, M.B., Golubev, A.N., Ignatenko, C.B. Vliyanie chisla faz na pul'satsii momenta i vibroshumovye kharakteristiki AD [The effect of the phase number on the torque pulsation and vibration and noise parameters of induction motors]. *Tezisy dokladov II Mezhdunarodnoy konferentsii po elektromekhanike i elektrotekhnologiyam v 2 ch., ch. 2* [Abstracts of the II International conference on electro-mechanics and electric technologies, in 2 parts, part 2]. Krym, 1996, pp. 150–152.

16. Kozyaruk, A.E., Rudakov, V.V. *Sistemy upravleniya elektropriwodov. Pryamoe upravlenie momentom v elektroprihode peremennogo toka* [Electric drive control

systems. Direct torque control in the AC electric drive]. Saint-Petersburg: SPGGI(NIU), 2007. 75 p.

17. Kozyaruk, A.E. *Pryamoe upravlenie momentom v elektroprihode peremennogo toka mashin i mekhanizmov gornogo proizvodstva* [Direct torque control in the AC electric drive of machines and mechanisms of mining industry]. Saint-Petersburg: SPGGI(NIU), 2008. 99 p.

18. Usol'tsev, A.A. *Sovremennyy asinkhronnyy elektroprihod optiko-mekhanicheskikh kompleksov* [Modern induction electric drives of optical-mechanical complexes]. Saint-Petersburg: SPb NIU ITMO, 2011. 164 p.

19. Vol'dek, A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Leningrad: Energiya, 1974.

20. Tereshkin, V.M. *Vestnik Moskovskogo aviatcionnogo instituta*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 212–219.

21. Tereshkin, V.M. *Vestnik Moskovskogo aviatcionnogo instituta*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 229–239.

*Терешкин Владимир Михайлович,*

ФГБОУВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, телефон (3472) 72-36-25, e-mail: office@ugatu.su

*Tereshkin Vladimir Mikhailovich,*

Ufa State Aviation Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electromechanics Department, tel. (3472) 72-36-25, e-mail: office@ugatu.su