

УДК 621.3.079

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_37

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ВИБРАЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСРЕДСТВОМ МКЭ-МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.И. Ермолаев

Институт проблем машиностроения Российской академии наук
Нижний Новгород, Россия
e-mail: acidwolfvx@rambler.ru

В.И. Ерофеев

Институт проблем машиностроения Российской академии наук
Нижний Новгород, Россия
e-mail: erof.vi@yandex.ru

А.С. Плехов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: [0000-0002-6954-3295](https://orcid.org/0000-0002-6954-3295) e-mail: aplehov@mail.ru

Д.Ю. Титов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: [0000-0001-7320-984X](https://orcid.org/0000-0001-7320-984X) e-mail: dm_titov@list.ru

Рассмотрены причины возникновения магнитных вибраций статоров асинхронных электродвигателей и приведено математическое описание процесса их возбуждения. Представлены зависимости, позволяющие определить взаимосвязь между волнами магнитной индукции в воздушном зазоре асинхронной машины, волнами радиальных магнитных сил, действующих на статор со стороны магнитного поля, и изгибными деформациями ядра статора. С использованием этих зависимостей в среде мультифизического конечно-элементного проектирования была разработана модель асинхронного электродвигателя марки АИР180М4У3. Данная модель на основании заданной геометрии двигателя, свойств материалов и формы тока статорной обмотки позволяет исследовать одновременно протекающие взаимосвязанные электромагнитные, механические, акустические и тепловые процессы в разных элементах электрической машины с учетом вращения ротора под действием магнитных сил. Результаты моделирования позволили определить величину радиальной магнитной силы, действующей на статор, формы и частоты волн его деформации, необходимые при проектировании активных методов снижения магнитных вибраций путем изменения спектрального состава питающего напряжения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, деформации статора, магнитные вибрации, магнитная индукция, метод конечных элементов, мультифизическое моделирование, радиальные магнитные силы.

Для цитирования: Ермолаев, А.И. Исследование магнитной вибрации в асинхронном электродвигателе посредством МКЭ-моделирования / А.И. Ермолаев, В.И. Ерофеев, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 37-56. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_37

STUDY OF MAGNETIC VIBRATION OCCURRING IN INDUCTION MOTOR USING FEM SIMULATION

A.I. Ermolaev

Mechanical Engineering Research Institute of RAS
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: acidwolfvx@rambler.ru

V.I. Erofeev

Mechanical Engineering Research Institute of RAS
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: erof.vi@yandex.ru

A.S. Plekhov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: [0000-0002-6954-3295](https://orcid.org/0000-0002-6954-3295) e-mail: aplehov@mail.ru

D.Yu. Titov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: [0000-0001-7320-984X](https://orcid.org/0000-0001-7320-984X) e-mail: dm_titov@list.ru

Abstract. The article discusses the reasons of the magnetic vibrations occurrence in the induction motors stators and provides a mathematical description of the process of their excitation. Dependencies are given that make it possible to determine the relationship between the magnetic field waves in the airgap of an induction motor, the radial magnetic forces waves acting on the stator and the bending deformations waves of the stator yoke. Using these dependencies in a multiphysics finite element software a model of an induction motor AIR180M4U3 was developed. This model based on the given engine geometry, material properties and the current shape in the stator winding, makes it possible to study simultaneously interconnected electromagnetic, mechanical, acoustic and thermal processes in different elements of an electric machine, taking into account the rotation of the rotor under the influence of magnetic forces. At the first stage of the study, graphs of the magnetic field in an induction motor in the time domain were ob-

tained taking into account the synchronous rotation of the rotor. At the second stage of the study, on the basis of the previously obtained values of the magnetic fields in the motor airgap, graphs of the radial magnetic forces acting on the stator were obtained, the stator deformations caused by them and the emitted acoustic noise were determined. At the third stage of the study, the eigenfrequencies of the stator oscillations, the modes (shapes) corresponding to these frequencies and the displacement spectrograms of the stator due to magnetic vibration, were determined. The simulation results made it possible to determine the magnitude of the radial magnetic force acting on the stator, the shape and frequency of its deformation waves, which are necessary in the design of active methods for reducing magnetic vibrations by changing the spectral composition of the supply voltage.

Keywords: finite element method, induction motor, magnetic vibrations, magnetic field, Maxwell forces, multiphysics simulation, radial magnetic forces, stator deformations.

For citation: A.I. Ermolaev, V.I. Erofeev, A.S. Plekhov and D.Yu. Titov, “Study of magnetic vibration occurring in induction motor using FEM simulation”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 37-56, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_37

I. Введение

Магнитная вибрация является проблемой практически всех электрических машин средней и большой мощности [1-4]. Она приводит к множеству неблагоприятных явлений: изменению гармонического состава питающего тока, износу подшипников, акустическому шуму, увеличению потребляемой мощности и разрушению электродвигателей [2-4]. Наиболее сильно магнитная вибрация проявляется в асинхронных электродвигателях (АД), характеризующихся вращающимся магнитным полем относительно неподвижного статора машины. Волны радиальной магнитной силы вызывают в таких машинах периодическую деформацию статоров, проявляющуюся, прежде всего, в виде акустического шума. Известно, что амплитуда магнитных вибраций статора АД может превышать 0,3 мм [3].

Изучению магнитной вибрации и разработке методов и средств по борьбе с ними посвящено много работ как зарубежных, так и отечественных ученых. В 1970-1980 гг. И.Г. Шубов, Н.В. Астахов, В.С. Малышев, Н.Я. Овчаренко и др. заложили обширную фундаментальную базу по математическому описанию магнитных вибраций электрических машин, конструкционным способам их снижения [1, 4]. В 1990-2000 гг. в трудах таких исследователей, как D. Belkhaty, B. Cassoret, R. Corton, K.C. Maliti, D. Roger, E. Leleu, P. Pellerey, были предложены способы активного снижения магнитной вибрации статора АД путем добавления к питающему напряжению дополнительной компенсационной гармоники [3, 6-8]. Совершенно иные подходы предлагают исследования последнего десятилетия: D. Franck, K. Nameyer, A.C. Binoj Kumar, B. Saritha, H.A. Доброскок [2,

9, 10]. В этих работах рассматривается управление магнитной вибрацией путем заданного изменения углов и напряжений в системе векторного управления асинхронным электроприводом.

Несмотря на многообразие существующих способов активного гашения магнитных вибраций, почти все они опираются на одну и ту же теоретическую базу. Магнитные поля, радиальные магнитные силы и деформации статора рассматриваются как волны определенной частоты, пространственного порядка и амплитуды; для достижения эффективного снижения магнитных вибраций нужно точно определить взаимосвязь параметров колебаний этих физических величин. Особые трудности возникают при определении взаимосвязи волн деформации статора с волнами магнитных сил, поскольку сердечник статора имеет сложную геометрическую форму, на каждую грань которой действует магнитная сила с различной амплитудой и направлением. Как правило, механический расчет осуществляется методом конечных элементов, а его результаты уже используются в другом пакете прикладных программ с более простым интерфейсом и настройками узлов (например, *Matlab Simulink*). Однако такой подход не позволяет учесть взаимовлияние всех мультифизических процессов друг на друга в процессе симуляции.

Целью данной статьи является разработка модели АД в среде мультифизического конечно-элементного проектирования для последующего исследования взаимосвязанных электромагнитных, механических и акустических процессов, связанных с возбуждением магнитных вибраций статора, с учетом синхронного вращения ротора под действием электромагнитного момента.

II. Возбуждение магнитных сил в асинхронном двигателе

Периодические радиальные магнитные силы в бездефектных АД, являющиеся основными источниками их вибрации [4, 11], вызваны действием магнитного поля B в зазоре АД на сталь статора [3, 4, 12]:

$$F_r(x, t) = \frac{B^2(x, t)}{2 \cdot \mu_0}, \quad (1)$$

где x – угловая координата воздушного зазора; t – время; μ_0 – магнитная постоянная.

Одним из направлений снижения виброактивности этих электрических машин является управление спектром магнитного поля в воздушном зазоре [3, 12]. Наиболее распространенным ввиду гибкости и простоты реализации является метод активного уменьшения вибраций АД, основанный на управлении током статора, при котором к основному питающему напряжению добавляется дополнительная компенсационная гармоника или несколько гармоник, формируемых ШИМ. Задача компенсационной

гармоники заключается в подавлении одной из гармоник магнитного поля, порождаемых питающим напряжением, вызывающей наиболее интенсивные вибрации статора АД. Сущность этого метода описана в работах [6-8].

Вибровозмущающая сила, порождаемая магнитным полем в воздушном зазоре АД при его питании от преобразователя частоты (ПЧ) с учетом компенсационной гармоники B^i , будет равна:

$$F_r(x, t) = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \left(B_1(x, t) + B^i(x, t) + \sum_{g=2}^{\infty} B_g(x, t) \right)^2, \quad (2)$$

где g – номер гармоники индукции магнитного поля; $B_1(x, t)$ – первая гармоника магнитного поля в зазоре АД; $B^i(x, t)$ – вводимая i -я гармоника магнитного поля; $B_g(x, t)$ – гармоники магнитного поля высшего порядка, обусловленные зубчатостью ротора, неравномерностью зазора и т.д.

Поскольку вводимый ток имеет малые амплитудные значения (не более 15 % от амплитуды питающего тока [2, 6, 7]), амплитуды гармоник вибровозмущающих сил, определяемые амплитудами индукции магнитного поля в воздушном зазоре со значением $(B_{m1})^2 / 4 \cdot \mu_0$ и $B_{m1} \cdot \Sigma B_{mg} / 2 \cdot \mu_0$ пренебрежительно малы. Значительное влияние на возбуждение вибрации статора АД оказывают всего две гармоники вибровозмущающей силы $F_r^i(x, t)$, порожденные взаимодействием основной и компенсационной гармоник магнитного поля. Эти гармоники описываются уравнениями вида:

$$F_r^i(x, t) = \frac{B_m^i \cdot B_{m1}}{2 \cdot \mu_0} \cdot \left(\cos \left[2 \cdot Z_p \cdot x - (\omega^i + \omega_1) \cdot t - (\varphi^i + \varphi_1) \right] + \right. \\ \left. + \cos \left[-(\omega^i - \omega_1) \cdot t - (\varphi^i - \varphi_1) \right] \right), \quad (3)$$

где B_{m1} – амплитуда 1-й гармоники магнитного поля в зазоре АД; B_m^i – амплитуда компенсационной гармоники; Z_p – число пар полюсов АД; ω_1 – угловая частота магнитного поля в зазоре; φ_1 – начальная фаза магнитного поля в зазоре АД; ω^i – частота вводимой гармоники магнитного поля; φ^i – начальная фаза вводимой гармоники магнитного поля.

Данные гармоники вибровозмущающей силы имеют порядки пространственных колебаний $2 \cdot Z_p$ и 0 соответственно. Чтобы аналитически определить наиболее выраженную гармонику вибровозмущающей силы, необходимо знать ее основные параметры, а именно: частоту, амплитуду и начальную фазу:

$$F_r(x, t) = F_m \cdot \cos(r \cdot x - \omega \cdot t - \varphi), \quad (4)$$

где F_m – амплитуда вибровозмущающей силы, r – порядок пространственных колебаний, ω – частота колебаний вибровозмущающей силы, φ – начальная фаза вибровозмущающей силы.

Гармоника с порядком пространственных колебаний 0, согласно [2, 4], останется и будет вызывать вибрации, но с амплитудой, много меньшей по сравнению с силой (4).

Порядок пространственных колебаний $r = 0$, обусловленный интерференцией двух гармоник индукции магнитного поля в зазоре АД с одинаковыми пространственными периодами (модами), подразумевает равномерную радиальную деформацию статора вдоль всего воздушного зазора. Радиальные силы второго порядка ($r = 2$) и выше вызывают изгибные деформации статора (рис. 1).

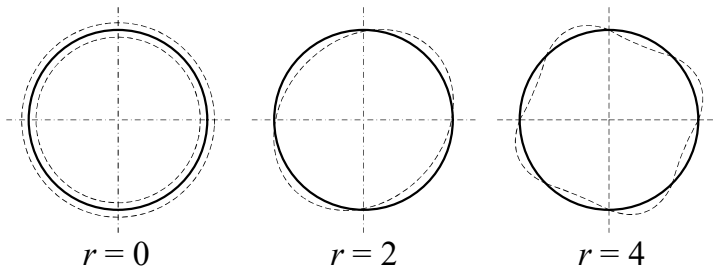


Рис. 1. Формы колебаний ярма статора

Fig. 1. Mode numbers and shapes of deformation of the stator yoke

III. Расчет магнитных вибраций статора асинхронного двигателя

Вибровозмущающие силы одного гармонического состава вызывают вибрации статора АД другого гармонического состава [3, 4]. Это связано с тем, что статор АД с позиции механики обладает своей амплитудно-частотной характеристикой с несколькими собственными частотами. Следовательно, спектральный состав радиальных магнитных сил будет существенно отличаться от гармонического состава вибраций статора АД.

При пространственных колебаниях порядка $r = 2$ и более статор претерпевает деформации сложной пространственной формы r -угольника с собственной частотой, равной [4]:

$$\omega_r = \frac{r(r^2 - 1)}{\sqrt{r^2 + 1}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot m \cdot R_{\text{ст}}^4}}. \quad (5)$$

где E – модуль упругости ярма статора; h – высота спинки статора; $R_{ст}$ – внешний радиус статора; m – приведенная масса ярма статора, определяемая по формуле:

$$m = \frac{m_{ст}}{2 \cdot \pi \cdot R_{ст} \cdot l_t}, \quad (6)$$

где $m_{ст}$ – масса стали статора, l_t – длина статора.

Анализ (5) позволяет сделать вывод о том, что наибольшей амплитудой характеризуются колебания с порядком $r = 2$, так как их частота ниже, чем у прочих форм колебаний [2, 4]. Вместе с тем, в случае питания АД от ПЧ значительное влияние на виброактивность статора оказывают и колебания порядка $r = 2 \cdot Z_p = 4$.

Механический импеданс z_ω статора на частоте ω возбуждающих сил будет определяться следующим образом:

$$z_\omega = \omega \cdot m - \frac{1}{\omega \cdot \lambda_{ст}} = \omega \cdot m - \frac{E \cdot h}{R_{ст}^2 \cdot \omega}, \quad (7)$$

где $\lambda_{ст}$ – механическая податливость статора.

Поскольку вибрации наибольшей интенсивности возникают вследствие взаимодействия первой и высших гармоник магнитного поля в воздушном зазоре АД, пространственно-временное распределение вибровозмущающих сил вдоль воздушного зазора будет иметь следующий вид:

$$F_r(x, t) = \sum_{g=1}^{\infty} F_{rgm} \cdot \cos((Z_p \pm Z_p) \cdot x - 2(1 \pm g)\omega_0 t - (\varphi_{12} \pm \varphi_{12g})), \quad (8)$$

где F_{rgm} – амплитуда g -й гармоники радиальной магнитной силы, ω_0 – частота питающей сети; φ_{12} – фаза 1-й гармоники тока намагничивания; φ_{12g} – фаза g -й гармоники тока намагничивания.

Амплитудные значения гармоник радиальной вибровозмущающей силы F_{rgm} могут быть определены из соотношения:

$$F_{rgm} = \frac{B_\delta^2 \cdot R \cdot I_{12g}}{2 \cdot \mu_0 \cdot R_{ст} \cdot I_{12}}, \quad (9)$$

где R – внутренний радиус статора; I_{12} – амплитуда 1-й гармоники тока намагничивания согласно Т-образной схеме замещения I_{12g} – амплитуда g -й гармоники тока намагничивания.

С использованием полученных значений F_{rgm} можно определить значения виброскоростей статора, вызванных магнитной вибрацией:

$$\dot{y} = \frac{F_{rgm} \cdot R}{z_{ст} \cdot R_{ст}}. \quad (10)$$

IV. Мультифизическая конечно-элементная модель двигателя

Приведенная выше теория, хотя и позволяет достаточно точно описать процессы возбуждения магнитной вибрации статоров АД, характеризуется большим количеством допущений и ограничений. К таковым относятся: равномерность воздушного зазора, постоянство скорости вращения ротора, равномерность зубчатости стали статора и ротора, периодичность и равномерность питающего напряжения на обмотках статора. Учет одного из этих факторов приводит к существенному усложнению математических выражений, описывающих процессы возбуждения магнитных вибраций, и зачастую требует введения дополнительных ограничений, например, учета лишь двух-трех гармоник питающего тока при описании волн магнитной индукции с учетом двусторонней зубчатости [2, 4]. Кроме того, поскольку описание магнитной индукции осуществляется методом гармонических проводимостей, в уравнении делается допущение постоянства ширины воздушного зазора во времени при расчете функции магнитной проводимости, тогда как под действием магнитных сил статор подвержен изгибным деформациям, влияющим на магнитное поле и магнитную проводимость [1,10].

Современные программные среды мультифизического конечно-элементного моделирования, такие как *Ansys*, *COMSOL*, *FEATool*, Логос позволяют учесть большую часть интересующих исследователя факторов без необходимости самостоятельно составлять и решать громоздкие и сложные для восприятия уравнения. Более того, эти программные среды позволяют учитывать изменения, происходящие на одном уровне физики, при симуляции процессов других областей физики. Таким образом, все исследуемые процессы являются взаимосвязанными и взаимодействующими.

Объектом исследования был выбран асинхронный двигатель АИР180М4У3 мощностью 30 кВт и синхронной скоростью вращения 1500 об/мин. Таким образом, АД относится к машинам средней мощности (20-250 кВт), а волны радиальных магнитных сил, действующих на статор, имеют пространственный порядок $r = 4$. Некоторые геометрические и технические характеристики приведены в табл. 1 [11, 13].

Стоит отметить, что с целью упрощения модели и повышения схожести расчетов число пазов ротора было уменьшено с 39 до 36, статор-

ная обмотка в каждом пазе представлена отдельной гомогенной многовитковой катушкой, другой конец которой замыкается снаружи статора. В противном случае несимметричность переплетающихся обмоток потребовала бы отрисовки геометрии всего двигателя, что повысило бы сложность задачи в связи с многократным увеличением числа степеней свободы сетки МКЭ-модели. Роторная обмотка представлена сплошным медным проводником, представляющим собой беличью клетку. Геометрия модели АД марки АИР180М4У3 и расчетная сетка приведены на рис. 2.

Таблица 1.
Геометрические и технические параметры двигателя АИР180М4У3

Table 1.
Geometric and technical parameters of AIR180M4U3

№	Физ. величина	Значение	Ед. изм.
1	Питающее напряжение	380	В
2	Питающий ток	57	А
3	Число пар полюсов	2	–
4	Диаметр сердечника статора внешний	0,313	м
5	Диаметр сердечника статора внутренний	0,211	м
6	Длина сердечников статора и ротора	0,185	м
7	Ширина воздушного зазора	0,0006	м
8	Высота спинки статора	0,01	м
9	Высота паза статора	0,041	м
10	Высота паза ротора	0,025	м
11	Ширина паза статора (внутр./внешн.)	3,2 / 9	мм
12	Ширина паза ротора (внутр./внешн.)	11 / 8	мм
13	Число пазов статора	48	–
14	Число пазов ротора	36	–
15	Число проводников в одной обмотке	17	–

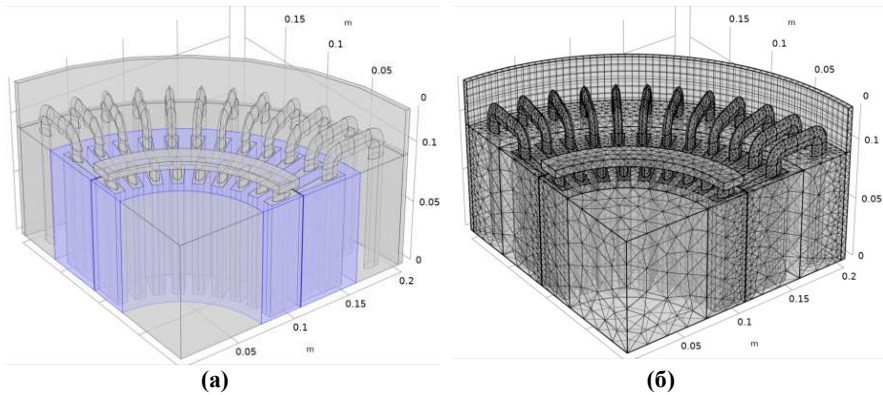


Рис. 2. Расчетная модель двигателя AIR180M4U3: геометрия модели (а); расчетная сетка (б)

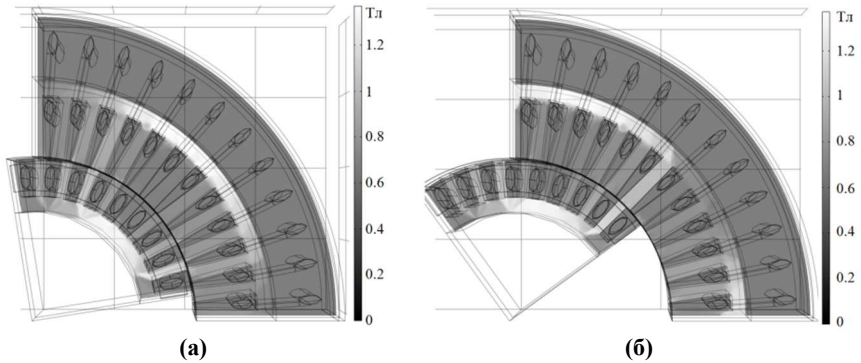
Fig. 2. A computational model of AIR180M4U3 motor: geometry (a); computational grid (b)

На рис. 2,а видно, что на внешней границе модели и в области воздушного зазора сетка имеет распределение «*Swept*», что необходимо для решения задач с тождественной парой на границе между подвижной и неподвижной частями модели, описывающей процессы в роторе и статоре соответственно. Отдельная сетка была наложена на боковые границы модели с целью достижения ее симметрии и выполнения расчетов таким образом, как будто геометрия всего двигателя отрисована полностью.

IV. Моделирование электромагнитных процессов

С использованием разработанной мультифизической конечно-элементной модели было проведено исследование возбуждения магнитного поля токами в обмотках АД с учетом вращения ротора и двусторонней зубчатости. Питающий ток статора имеет идеальную синусоидальную форму. Полученные в процессе исследования графики приведены на рис. 3.

Из результатов моделирования следует, что волны магнитной индукции имеют пространственный порядок $r = 2$, вращаются с синхронной частотой $\omega_1 = 157$ рад/с вдоль воздушного зазора, а в процессе вращения амплитуда колеблется в интервале 1,3-1,5 Тл, что вызвано периодичностью питающего тока и влиянием двусторонней зубчатости.

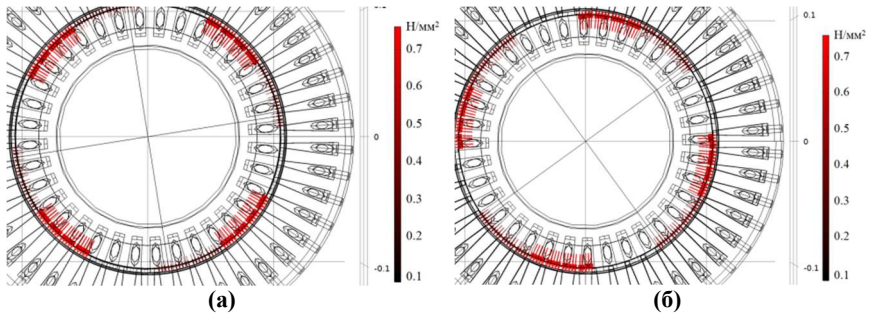


**Рис. 3. Магнитная индукция в AIR180M4U3:
 $t = 1$ мс (а); $t = 4$ мс (б)**

**Fig. 3. Magnetic flux density in AIR180M4U3 motor:
 $t = 1$ ms (a); $t = 4$ ms (b)**

V. Моделирование механоакустических процессов

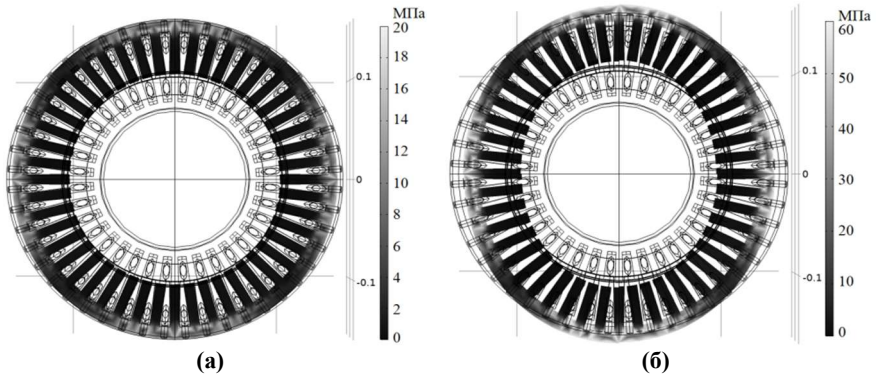
С использованием полученных результатов исследования магнитных полей в АД и (1) были получены графики распределения радиальных магнитных сил, действующих на статор. При расчетах сделано предположение, что магнитные силы действуют на зубцы статора, поскольку именно в воздушном зазоре магнитное поле ориентировано по нормали [4]. Пространственное распределение радиальных магнитных сил, действующих на статор, приведено на рис. 4.



**Рис. 4. Радиальные магнитные силы в AIR180M4U3:
 $t = 1$ мс (а); $t = 4$ мс (б)**

**Fig. 4. Radial magnetic (Maxwell) forces in AIR180M4U3 motor:
 $t = 1$ ms (a); $t = 4$ ms (b)**

Результаты расчета пространственно-временных распределений действующих магнитных сил позволили определить поля механических напряжений по фон Мизесу, вызванных действием магнитных сил на статор, деформаций и излучаемого шума во временной области. На рис. 5 представлены графики механических напряжений и деформаций стального сердечника статора при действии магнитных сил (рис. 4).



**Рис. 5. Напряжения по фон Мизесу в стали статора AIR180M4U3:
 $t = 1$ мс (а); $t = 4$ мс (б)**

**Fig. 5. Von Mises stress in the stator core of AIR180M4U3 motor:
 $t = 1$ ms (a); $t = 4$ ms (b)**

Из графиков напряжений (рис. 5) следует, что в стали статора при действии магнитной силы с порядком $r = 4$ доминирует форма колебаний с порядком $r = 2$ и амплитудой 0,03 мм. При этом волны деформаций на частоте вибровозмущающей силы практически неподвижны, тогда как сами магнитные силы «вращаются» синхронно с магнитным полем.

В процессе своей периодической деформации сталь статора является сильным источником шума, преимущественно в диапазоне от 100 до 4000 Гц. Полученные в ходе моделирования графики, демонстрирующие излучаемые двигателем поля звуковых давлений, вызванные его магнитной вибрацией, представлены на рис. 6. Излучаемое двигателем звуковое давление p достигает амплитуды 5 Па, что соответствует уровню шума $L_p = 108$ дБ (относительно порога 20 мкПа). При расчете использовалось известное выражение [14, 15]:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{20 \cdot 10^{-6}}. \quad (11)$$

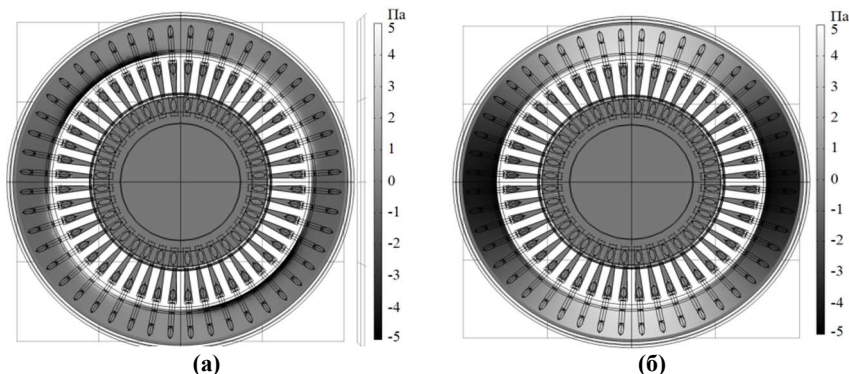


Рис. 6. Звуковое давление, излучаемое AIR180M4У3:
 $t = 1$ мс (а); $t = 4$ мс (б)

Fig. 6. Acoustic radiation pressure of AIR180M4U3 motor:
 $t = 1$ ms (a); $t = 4$ ms (b)

VI. Частотный анализ стали статора двигателя

На предыдущих этапах магнитная вибрация статора АД AIR180M4У3 возбуждалась полем с частотой 50 Гц, индуцируемым токами идеальной синусоидальной формы. На практике основной шум излучается высшими гармониками тока на более высоких частотах (свыше 500 Гц). В этом же частотном диапазоне находятся собственные частоты колебаний статоров. Поскольку магнитные силы, действующие вблизи этих частот, способны вызывать существенные амплитуды деформаций статора, а, следовательно, и вибрации, при разработке системы активного гашения магнитной вибрации нужно уделить особое внимание гармоникам питающего тока, порождающим магнитные силы (8) с этой частотой.

Частотный анализ модели статора АД AIR180M4У3 позволил определить основные формы его колебаний с учетом действия силы согласно рис. 4. Внешний вид форм колебаний статора приведен на рис. 7. Результаты частотного анализа подтверждают, что доминирующей формой колебаний является форма с порядком $r = 2$ (рис. 7,а). Ее превалирование над другими модами подкрепляется близостью частоты магнитной силы ($f = 100$ Гц) к собственной частоте $f_1 = 165$ Гц. Вторая мода с частотой $f_2 = 571$ Гц характеризуется пространственным порядком $r = 4$ и отличается неравномерной деформацией вдоль оси. Третья мода имеет пространственный порядок $r = 6$ и частоту $f_3 = 1556$ Гц, а четвертая – $r = 8$ и $f_4 = 1764$ Гц.

Согласно (8), магнитные вибрации на этих частотах могут возбудить гармоники тока $f_{g3} = 200$ Гц, $f_{g5} = 600$ Гц, $f_{g15} = 1600$ Гц, $f_{g17} = 1600$ Гц (частота третьей гармоники указана для формы колебаний $r = 0$).

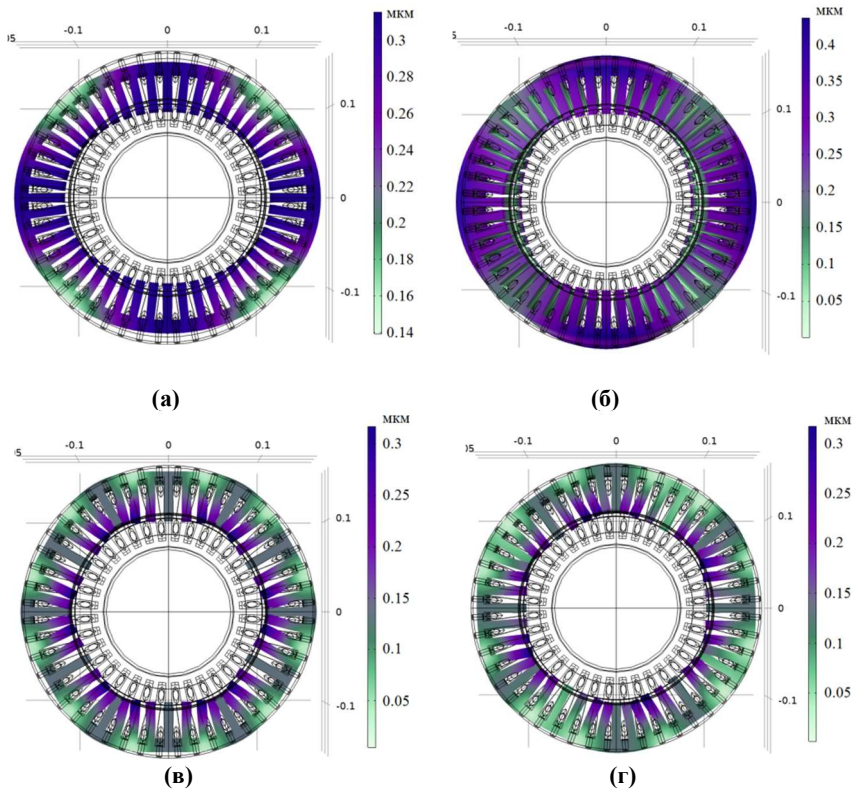
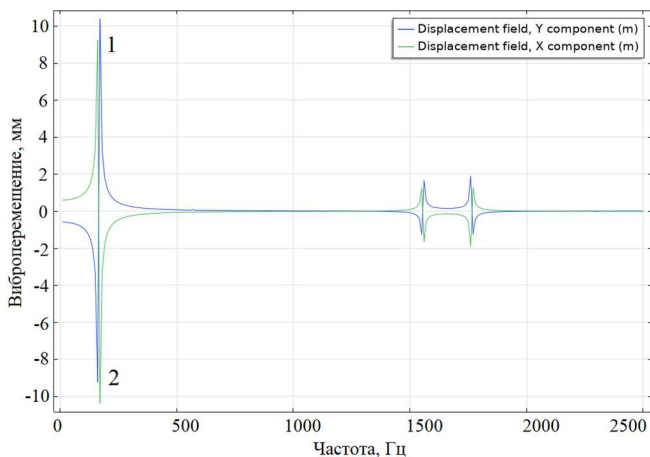


Рис. 7. Формы колебаний статора АИР180М4У3 на разных частотах:
 $f = 165$ Гц (а); $f = 571$ Гц (б); $f = 1556$ Гц (в); $f = 1764$ Гц (г)

Fig. 7. Deformation modes of the AIR180M4U3 at different frequencies:
 $f = 165$ Hz (a); $f = 571$ Hz (b); $f = 1556$ Hz (c); $f = 1764$ Hz (d)

В результате частотного анализа были получены спектры виброперемещений точек, расположенных на внешней стороне сердечника статора на пересечении координатных осей. Спектрограммы представлены на рис. 8 (амплитуды колебаний автоматически увеличены программой). Из анализа спектрограммы следует, что колебания статора на частоте $f_1 = 165$ Гц характеризуются значительно большей амплитудой, чем на других ча-

стотах. Примечательно, что амплитуда колебаний на частоте $f_2 = 571$ Гц на два порядка меньше, чем на первой моде.



**Рис. 8. Спектрограммы виброперемещений статора АИР180М4У3:
1 – по оси Y; 2 – по оси X**

**Fig. 8. Frequency responses of displacement of the stator
of AIR180M4U3 motor: 1 – at the Y axis; 2 – at the X axis**

VII. Моделирование прочих процессов в двигателе

Помимо исследования процесса возбуждения магнитных вибраций, разработанная программа позволяет изучать и другие процессы в двигателе: электрические потери в стали и обмотках, пульсации электромагнитного момента, нагрев обмоток и т.д. Более того, программа позволяет рассчитывать многие технические параметры: потребляемая мощность, активное и реактивное сопротивление обмоток, их индуктивность и т.д. На рис. 9 приведены результаты расчета потерь в обмотках электродвигателя, а на рис. 10 – диаграмма пульсаций электромагнитного момента в процессе работы АД. Эти возможности программы будут более подробно раскрыты в будущих исследованиях.

VIII. Заключение

В программной среде мультифизического конечно-элементного проектирования была разработана модель, позволяющая исследовать электромагнитные, механоакустические и энергетические процессы в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. При вычислениях учитывается взаимосвязанность и взаимовлияние процессов, происходящих на разных уровнях физики.

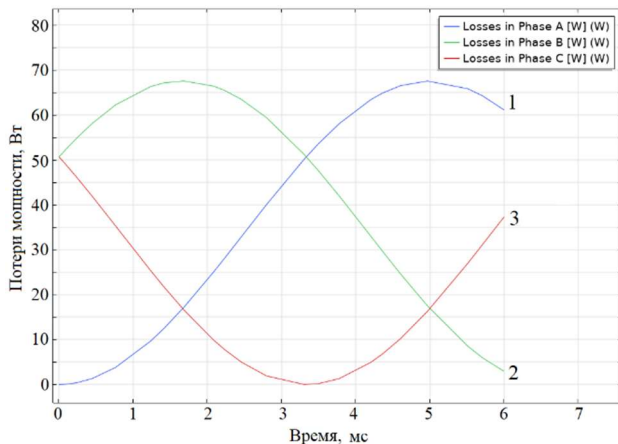


Рис. 9. Потери в обмотках статора AIR180M4U3:
1 – в фазе А; 2 – в фазе В; 3 – в фазе С

Fig. 9. Losses in the stator winding of AIR180M4U3:
1 – in the phase A; 2 – in the phase B; 2 – in the phase C

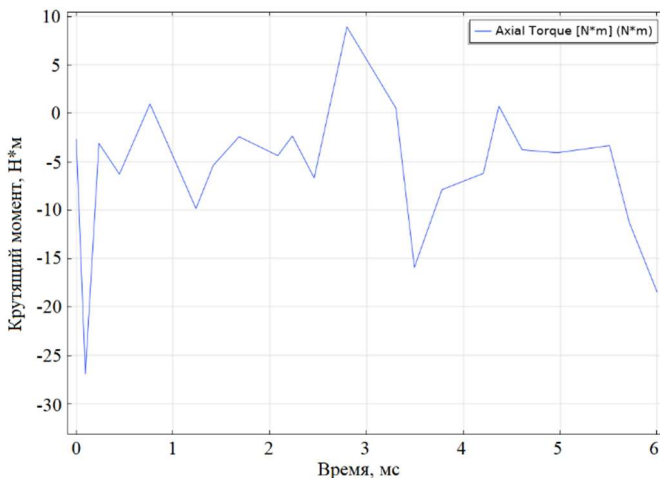


Рис. 10. Электромагнитный момент AIR180M4U3

Fig. 10. Electromagnetic torque of AIR180M4U3

В результате моделирования процессов в двигателе марки AIR180M4U3 были получены графики, показывающие пространственно-

временные распределения физических переменных, имеющих отношение к возбуждению магнитного шума и вибрации: магнитного поля, радиальной магнитной силы, деформации статора, излучаемого звукового давления. Было установлено, что вибрация статора происходит с порядком $r = 2$, а не $r = 4$, как должно следовать из теории. Колебания статора происходят без вращения синхронно с магнитным полем. Частотный анализ позволил выявить основные формы свободных колебаний статора двигателя АИР180М4У3 и соответствующие им частоты. Было подтверждено, что наибольшей амплитудой характеризуется первая мода с частотой $f_1 = 165$ Гц и $r = 2$, вторая мода ($f_2 = 571$ Гц, $r = 4$) меньше практически в 100 раз, третья и четвертая – меньше первой в 6 раз.

В будущем планируется использовать разработанную программу при исследовании влияния гармонического состава питающего тока на процессы возбуждения магнитных вибраций статоров асинхронных электродвигателей.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00372).

© Ермолаев А.И., 2021

© Ерофеев В.И., 2021

© Плехов А.С., 2021

© Титов Д.Ю., 2021

Поступила в редакцию 29.06.2021

Received 29.06.2021

Библиографический список

- [1] Астахов Н.В., Малышев В.С., Овчаренко Н.Я. Математическое моделирование вибраций асинхронных машин. Кишинев: Штиинца, 1987. – 145 с.
- [2] Доброскок Н.С. Алгоритмические методы снижения шумов и вибраций в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе: дис. канд. техн. наук, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», С.-Пб., 2014. – 162 с.
- [3] Maliti K.C. Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: doctoral dissertation. Stockholm, 2000. – 209 p.
- [4] Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
- [5] Leleu E., Espanet C., Miraoui A., Siala S. Analytical modelling of electromagnetic origin vibrations in an induction machine supplied by high power PWM inverter // in proc. IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Nov. 6-10, 2006, Paris, France. IEEE, 2007, pp. 836-843. DOI: 10.1109/IECON.2006.347731.
- [6] Belkhatat D., Roger D., Brudny J.F. Active reduction of magnetic noise in asynchronous machine controlled by stator current harmonics // in proc. 1997 Eighth In-

- ternational Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444), Sept. 1-3, 1997, Cambridge, UK. IET, 1997, pp. 400-405. DOI: 10.1049/cp:19971107.
- [7] Cassoret B., Corton R., Roger D., Brudny J.-F. Magnetic noise reduction of induction machines / B. Cassoret, // IEEE Transactions on Power Electronics. 2003. Vol. 18. No. 2. P. 570-579. DOI: 10.1109/TPEL.2003.809341.
- [8] Pellerey P., Favennec G., Lanfranchi V., Friedrich G. Active reduction of electrical machines magnetic noise by the control of low frequency current harmonics // in proc. IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Oct. 25-28, 2012, Montreal, QC, Canada. IEEE, 2012, pp. 1654-1659. DOI: 10.1109/IECON.2012.6388727.
- [9] Binojkumar A.C., Saritha B., Narayanan G. Acoustic noise characterization of space-vector modulated induction motor drives – an experimental approach // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. Vol. 62. No. 6. P. 3362-3371. DOI: 10.1109/TIE.2014.2374557.
- [10] Franck D., van der Giet M., Hameyer K. Active reduction of audible noise exciting radial force-density waves in induction motors // in proc. 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), May 15-18, 2011, Niagara Falls, ON, Canada. IEEE, 2011, pp. 1213-1218. DOI: 10.1109/IEMDC.2011.5994776.
- [11] Копылов И.П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
- [12] Shahaj A. Mitigation of vibration in large electrical machines: BEng(Hons) thesis. University of Nottingham, Nottingham, 2010. – 424 p.
- [13] Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
- [14] ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Единицы величин. Введ. 2003-09-01. ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева", 2003. – 40 с.
- [15] ГОСТ Р МЭК 60027-3-2016. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Обозначения буквенные, применяемые в электротехнике. Часть 3. Логарифмические и относительные величины и единицы измерений, Введ. 2017-02-01. М.: Стандартинформ, 2019. – 26 с.

References

- [1] N.V. Astakhov, V.S. Malyshev and N.Y. Ovcharenko, *Matematicheskoe modelirovanie vibracij asinhronnyh mashin [Mathematical modeling of vibrations of asynchronous machines]*. Chisinau: Shtiintsa, 1987 (in Russian).
- [2] N.S. Dobroskok, “*Algoritmicheskie metody snizheniya shumov i vibracij v chastotno-reguliruemom asinhronnom elektroprivode [Algorithmic methods of noise and vibration reduction in a frequency-controlled induction electric drive]*”, Cand. of Tech. S. thesis, ETU “LETI”, Saint-Peterburg, Russia, 2014 (in Russian).
- [3] K.C. Maliti, *Modeling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: doctoral dissertation*. Stockholm, 2000.
- [4] I.G. Shubov, *Shum i vibraciya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]*. Leningrad: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [5] E. Leleu, C. Espanet, A. Miraoui and S. Siala, “Analytical modelling of electromagnetic origin vibrations in an induction machine supplied by high power PWM in-

- verter”, in proc. *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Nov. 6-10, 2006, Paris, France, 2007, pp. 836-843. DOI: 10.1109/IECON.2006.347731.
- [6] D. Belkhat, D. Roger and J.F. Brudny, “Active reduction of magnetic noise in asynchronous machine controlled by stator current harmonics”, in proc. *1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444)*, Sept. 1-3, 1997, Cambridge, UK, pp. 400-405. DOI: 10.1049/cp:19971107.
- [7] Cassoret, B., R. Corton, D. Roger and J.-F. Brudny, “Magnetic noise reduction of induction machines”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 570-579, March 2003. DOI: 10.1109/TPEL.2003.809341.
- [8] P. Pellerey, G. Favennec, V. Lanfranchi and G. Friedrich, “Active reduction of electrical machines magnetic noise by the control of low frequency current harmonics”, in proc. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 25-28, 2012, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1654-1659. DOI: 10.1109/IECON.2012.6388727.
- [9] A.C. Binoj Kumar, B. Saritha and G. Narayanan, “Acoustic noise characterization of space-vector modulated induction motor drives – an experimental approach”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3362-3371, June 2015. DOI: 10.1109/TIE.2014.2374557.
- [10] D. Franck, M. van der Giet and K. Hameyer, “Active reduction of audible noise exciting radial force-density waves in induction motors”, in proc. *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, May 15-18, 2011, Niagara Falls, ON, Canada, 2011, pp. 1213-1218. DOI: 10.1109/IEMDC.2011.5994776.
- [11] I.P. Kopylov, [*Elektricheskie mashiny*] *Electric machines*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [12] A. Shahaj, “Mitigation of vibration in large electrical machines”, BEng(Hons) thesis, University of Nottingham, Nottingham, 2010.
- [13] A.E. Kravchik, M.M. Shlaf, V.I. Afonin and E.A. Sobolenskaja, *Asinkhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik [Induction motors series 4A: Handbook]*. Moscow, Energoatomizdat, 1982 (in Russian).
- [14] State system for ensuring the uniformity of measurements. Units of quantities, GOST 8.417-2002, Sept. 2003.
- [15] State system for ensuring the uniformity of measurements. Letter designations used in electrical engineering. Part 3. Logarithmic and relative quantities and units, GOST R IEC 60027-3-2016, Feb. 2017.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Ермолаев Артем Игоревич, кандидат технических наук, научный сотрудник Института проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Artem I. Ermolaev, Cand. Sci. (Eng.), researcher of the Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Ерофеев Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, директор Института проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Vladimir I. Erofeev, Doc. Sci. (Phys.-Math.), director of the Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Плехов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Alexandr S. Plekhov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Титов Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Dmitriy Yu. Titov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation