

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ОБМОТКИ СТАТОРА НА ВИБРАЦИИ КРУПНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЕ РОТОРА

В. В. Магин, М. Б. Панасюк, Д. А. Хнычев

Рассматривается влияние конфигурации обмотки статора на вибрации крупных синхронных машин с постоянными магнитами при эксцентриситете ротора. Объектом исследования является мощная многополюсная синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов и дробным числом пазов на полюс и фазу. В работе анализируется влияние статического эксцентриситета ротора на пульсации электромагнитного момента при различных значениях числа параллельных ветвей. С помощью программы конечно-элементного моделирования определены пульсации электромагнитного момента и его гармонический анализ. Результаты показывают, что использование параллельных ветвей обмотки статора в машинах с высокими показателями крутящего момента и статическим эксцентриситетом увеличивает виброактивность двигателя и вероятность перегрева обмотки статора из-за возникновения уравнивающих токов. Проведенное исследование показало, что следует избегать применения параллельных ветвей обмотки в крупных синхронных машинах, поскольку это приводит к увеличению вибраций и снижению надежности машины.

Ключевые слова: синхронная машина, постоянные магниты, эксцентриситет, пульсации момента, параллельные ветви, численное моделирование.

Введение

Синхронные машины с постоянными магнитами находят широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря своим высоким массогабаритным показателям и эффективности. Эти машины востребованы в электроприводах, где предъявляются жесткие требования к шумам и вибрациям.

Источники шума и вибрации в электрических машинах делятся на три основные категории [1, 2]: электромагнитные, механические, аэрогидродинамические.

Главным источником электромагнитного шума и вибрации являются электромагнитные силы, возникающие в воздушном зазоре между статором и ротором. Эти силы создают вращающиеся или пульсирующие силовые волны, вызывающие колебания конструкции машины. Другой важный источник электромагнитной вибрации – это явление магнитострикции, при котором материал сердечника меняет свои размеры под воздействием переменного магнитного поля. Интенсивность магнитного шума напрямую связана с частотой колебаний статора.

В механических источниках основными факторами возникновения вибраций являются подшипники (качения или скольжения) и несбалансированность ротора. Подшипники качения могут создавать вибрации из-за отклонений формы колец, несоосности подшипниковых узлов и изменения геометрии тел качения. Несбалансированный ротор вызывает значительные вибрации, особенно на высоких скоростях вращения.

Аэрогидродинамический шум связан с системой охлаждения машины. Основными элементами, создающими аэрогидродинамический шум, являются вентиляторы, вентиляционные каналы, поток охлаждающего воздуха или других хладагентов.

Проектирование регулируемого электропривода с повышенными требованиями к уровню вибраций и шума требует особого внимания к конструкции двигателя и технологиям его производства.

Одной из ключевых проблем, с которой сталкиваются инженеры в области электромеханики, является эксцентриситет ротора, который может возникнуть из-за производственных дефектов, таких как несоосность, износ подшипников и несоблюдение при изготовлении деталей и узлов допусков, заданных в конструкторской документации. Также эксцентриситет ротора может проявиться позже в результате особенностей эксплуатации. В крупных электрических машинах эксцентриситет практически неизбежен из-за большой массы ротора. Эксцентриситет приводит к увеличению потерь, механическим вибрациям и акустическому шуму, вызванным пульсирующими электромагнитными силами и моментами [3, 4].

Под эксцентриситетом понимается смещение оси ротора относительно геометрической оси статора. Различают два основных вида эксцентриситета: статический и динамический (рис. 1).

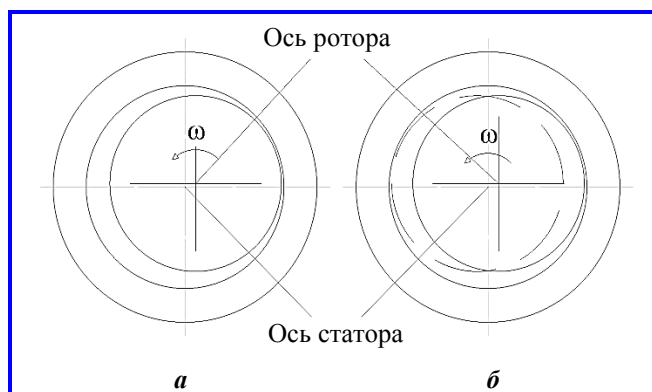


Рис. 1. Виды эксцентриситета: а – статический; б – динамический

Статический эксцентриситет характеризуется смещением (радиальным и угловым) оси вращения ротора относительно продольной оси статора. Динамический эксцентриситет характеризуется вращением смещенной оси ротора относительно продольной оси статора.

В данной статье исследуется влияние эксцентриситета ротора в синхронной электрической машине с постоянными магнитами и дробным числом пазов на полюс и фазу (q) больше 1 с несколькими параллельными ветвями (a) в обмотке статора. Объектом исследования является низкооборотная (менее 1000 об/мин) мощная (свыше 100 кВт) многополюсная синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов. Актуальность проблемы пульсаций электромагнитного момента таких электрических машин связана с их высоким базовым вращающим моментом. Следовательно, даже небольшим пульсациям электромагнитного момента в относительных единицах (менее 1% от номинального) соответствуют большие абсолютные значения, которые приводят к значительным вибрациям.

Динамический эксцентриситет ротора электрической машины зависит от остаточного небаланса ротора после его балансировки. В исследуемой электрической машине остаточный небаланс составляет 50 г·мм, смещение геометрической оси ротора относительно оси вращения при таком небалансе составляет менее 0,01 мм. Такое смещение можно считать незначительным, так как оно меньше размера элементарной ячейки расчетной сетки, следовательно, динамическим эксцентриситетом можно пренебречь.

Статический эксцентриситет приводит к неравномерности зазора по расточке статора. Неравномерность зазора влияет на распределение магнитного потока и, соответственно, на величину электромагнитных сил, действующих на ротор.

Конечно-элементное моделирование

Исследования проводились в программном комплексе конечно-элементного динамического моделирования электромагнитных полей.

С целью уменьшения времени переходных процессов при расчете рассматривался генераторный режим синхронной машины с активной нагрузкой, в плоскопараллельной постановке задачи, так как несимметрия магнитного поля вызвана радиальными смещениями ротора.

Для оценки влияния числа параллельных ветвей обмотки статора при наличии эксцентриситета и $q > 1$ на пульсации электромагнитного момента электри-

ческой машины исследована работа электрической машины без эксцентриситета и с различными значениями эксцентриситета для обмотки статора с одной и двумя параллельными ветвями.

На рис. 2 показано распределение двух параллельных ветвей фазы А по пазам статора. При анализе машины с двумя параллельными ветвями фазы А, В, С были разделены на параллельные ветви А1, А2, В1, В2, С1, С2 и соединены соответствующим образом в симуляторе внешних электрических цепей (рис. 3), интегрированном с программой динамического моделирования электромагнитных полей. Параллельные ветви фазы А показаны на рис. 2 соответственно синим и красным цветом.

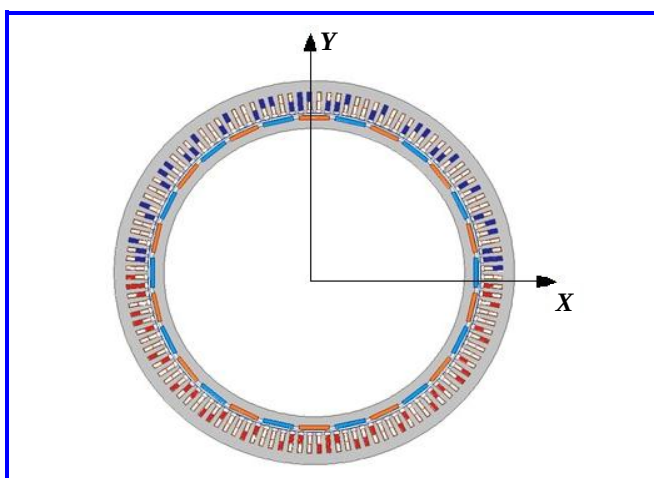


Рис. 2. Конечно-элементная модель синхронной машины

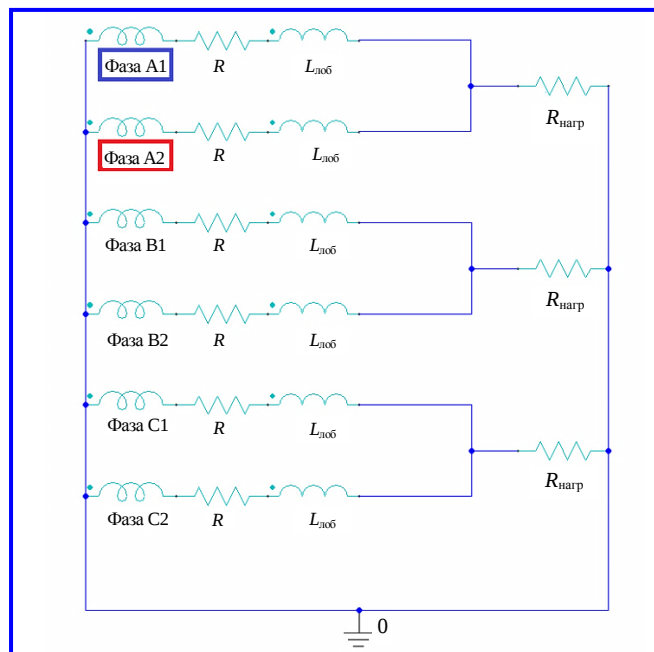


Рис. 3. Электрическая схема соединений обмотки статора (R – сопротивление параллельной ветви фазы обмотки статора, Ом; $L_{\text{лб}}$ – индуктивность лобовых частей обмотки статора, Гн; $R_{\text{нагр}}$ – сопротивление нагрузки, Ом)

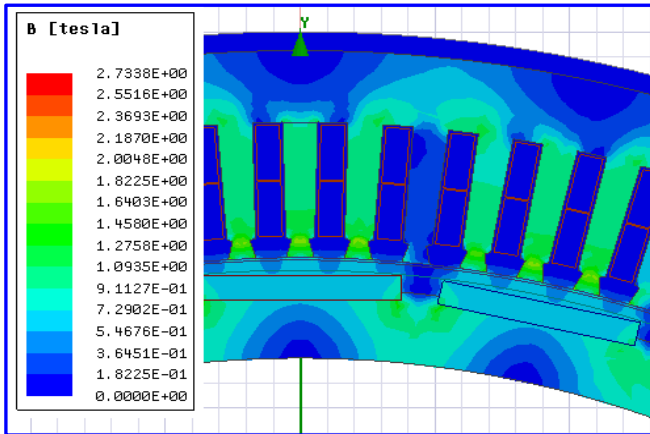


Рис. 4. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении синхронной машины

Рассмотрено одно из возможных расположений параллельных ветвей фаз обмотки, при котором параллельные ветви располагаются на диаметрально противоположных полуокружностях зубцово-пазовой зоны статора. Данный вариант расположения параллельных ветвей фаз является наиболее распространенным и рекомендован в [2]. Остальные фазы

заданы таким же образом и смещены друг относительно друга на 120 электрических градусов.

Статический эксцентриситет в исследуемой электрической машине осуществлялся путем смещения ротора вдоль оси Y (рис. 2).

В результате электромагнитного расчета электрической машины без эксцентриситета ротора были получены: распределение электромагнитной индукции в поперечном сечении двигателя (рис. 4); график зависимости электромагнитного момента от времени (рис. 5) и его гармонический состав (рис. 6); кривые напряжений и токов параллельных ветвей $A1$ и $A2$ во времени (рис. 7).

Гармонический состав электромагнитного момента был проанализирован на основе графика изменения момента на одном периоде изменения тока (рис. 8).

Анализ полученных данных показал, что при отсутствии эксцентриситета пульсации электромагнитного момента под нагрузкой не превышают 0,63% от номинального момента, а токи и напряжения в параллельных ветвях симметричны и полностью совпадают.

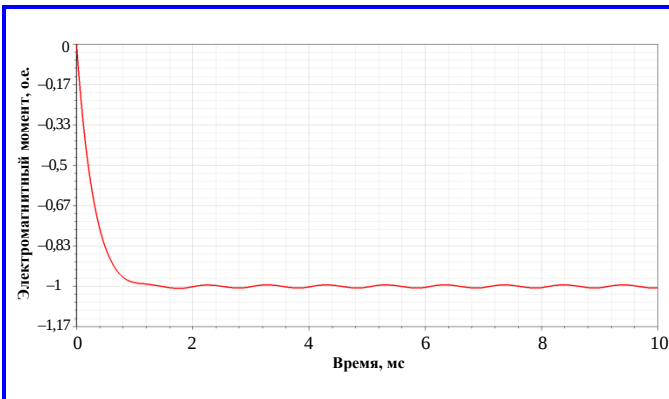


Рис. 5. Электромагнитный момент синхронной машины

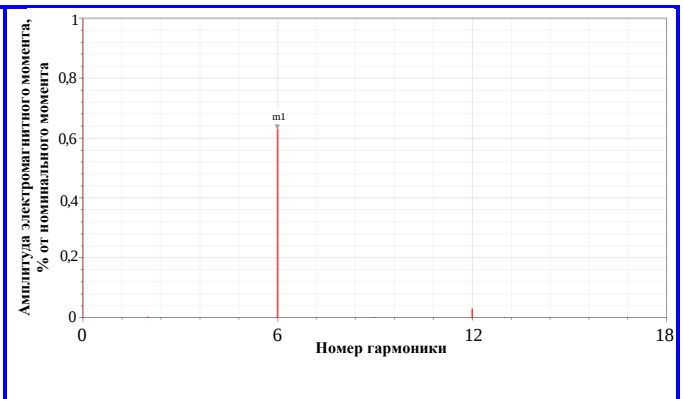


Рис. 6. Гармонический состав электромагнитного момента

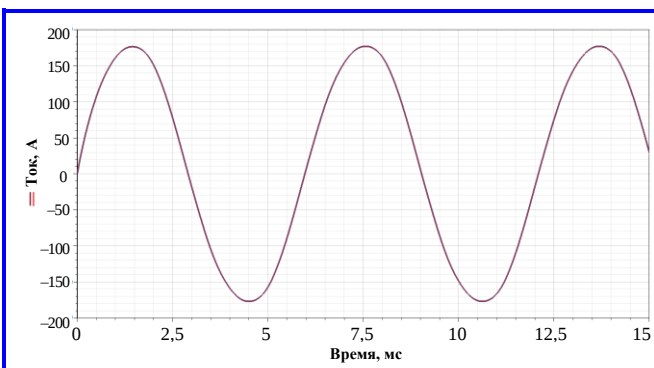


Рис. 7. Токи параллельных ветвей $A1$ и $A2$ при отсутствии эксцентриситета

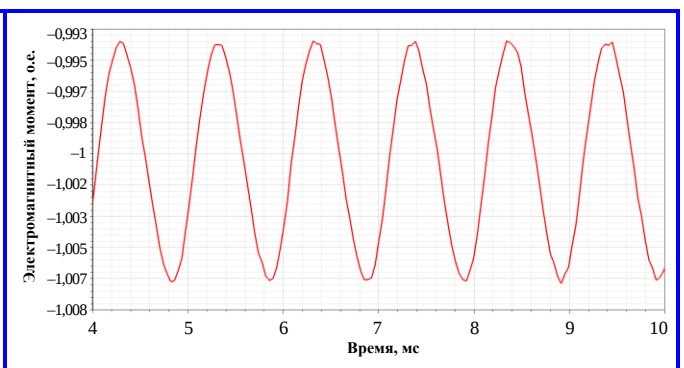


Рис. 8. Электромагнитный момент синхронной машины на периоде

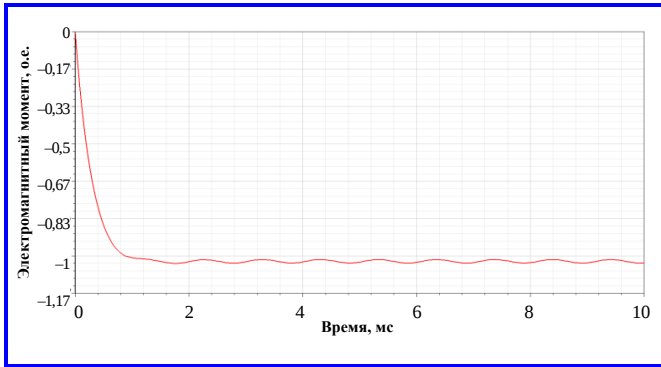


Рис. 9. Электромагнитный момент синхронной машины при $a = 1$ и эксцентриситете

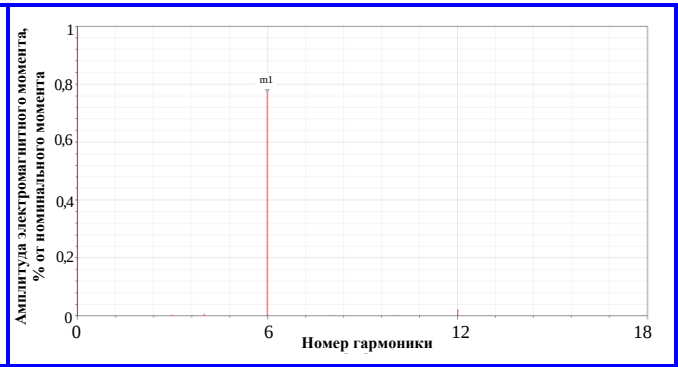


Рис. 10. Гармонический состав электромагнитного момента при $a = 1$ и эксцентриситете

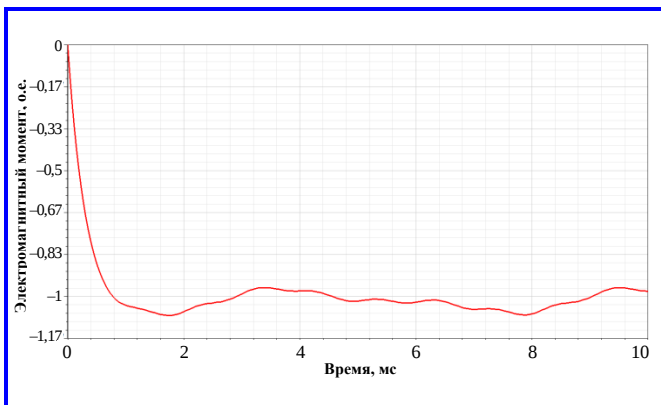


Рис. 11. Электромагнитный момент синхронной машины при $a = 2$ и эксцентриситете

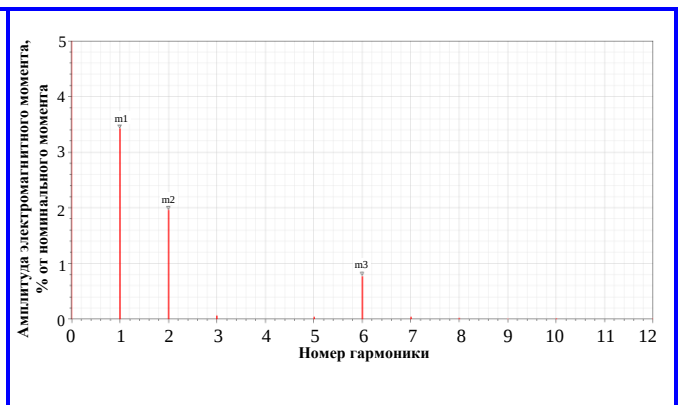


Рис. 12. Гармонический состав электромагнитного момента при $a = 2$ и эксцентриситете

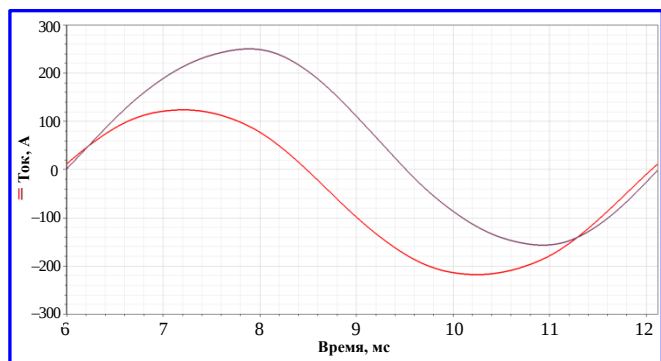


Рис. 13. Токи параллельных ветвей A1 и A2 при эксцентриситете

При работе двигателя с одной параллельной ветвью в обмотке статора и максимально возможном эксцентриситете, при котором ротор смещается по вертикальной оси вниз, характер кривой электромагнитного момента во времени существенно не изменяется (рис. 9). Пульсации в этом случае не превышают 0,77% от номинального момента (рис. 10), что является допустимым значением и не приводит к существенному увеличению виброактивности двигателя.

При работе двигателя с двумя параллельными ветвями обмотки статора и эксцентриситетом наблюдаются значительные пульсации электромагнитного момента (рис. 11), достигающие 3,43 и 1,96 % от номинального момента соответственно на одинарной и двойной частотах сети (рис. 12). Такие пульсации приводят к существенным низкочастотным вибрациям двигателя и являются недопустимыми при работе в составе электропривода. Кроме того, на осциллограммах токов параллельных ветвей фазы обмотки статора (рис. 13) наблюдается значительная разница в величинах токов параллельных ветвей обмотки, что может привести к выходу из строя двигателя вследствие перегрева из-за уравнивающих токов, которые в свою очередь возникают из-за разности электродвижущих сил (ЭДС) параллельных ветвей. В данном случае разность действующих значений ЭДС параллельных ветвей составляет 1,3 В.

Заключение

Проведенное исследование показало, что в крупных электрических машинах или в машинах с высокими показателями крутящего момента, где возможны значительные величины статического эксцен-

триситета, следует избегать применения параллельных ветвей обмотки статора. Использование параллельных ветвей в таких электрических машинах приводит к увеличению шумов и вибраций и создает риск перегрева обмотки статора из-за появления уравнивающих токов, обусловленных значительным эксцентриситетом ротора относительно статора.

Литература

1. Pop, C. V. Noise and vibrations analysis of a permanent magnet synchronous machine for light electric vehicle / C. V. Pop,

O. Birte, D. Fodorean // 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). – 2017. – P. 1–5.

2. Шубов, И. Г. Шум и вибрация электрических машин / И. Г. Шубов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 208 с. : ил.

3. Эксцентриситет ротора синхронных машин с постоянными магнитами / В. Я. Беспалов, М. Е. Коварский, А. О. Сидоров [и др.] // Электричество. – 2018. – № 12. – С. 34–40.

4. Effect of Rotor Eccentricity in Large Synchronous Machines / M. Michon, R. C. Holehouse, K. Atallah [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – Vol. 50. – No. 11. – P. 1–4.

Поступила в редакцию 23.01.2025

Вячеслав Валерьевич Магин, начальник лаборатории.

Максим Борисович Панасюк, ведущий инженер.

Т. 8 (495) 365-26-14.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Данила Андреевич Хнычев, магистрант, инженер, e-mail: danila.khnychiiov@mail.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»; Национальный исследовательский университет «МЭИ»).

THE INFLUENCE OF STATOR WINDING CONFIGURATION ON VIBRATIONS OF LARGE SYNCHRONOUS MACHINES WITH PERMANENT MAGNETS WITH ROTOR ECCENTRICITY

V. V. Magin, M. B. Panasyuk, D. A. Khnychev

The paper considers the influence of the stator winding configuration on the vibrations of large synchronous machines with permanent magnets with rotor eccentricity. The object of the study is a powerful multi-pole synchronous machine with excitation from permanent magnets and a fractional number of slots per pole and phase. The paper analyzes the influence of the static eccentricity of the rotor on the pulsations of the electromagnetic torque at different values of the number of parallel branches. Using the finite element modeling program, the pulsations of the electromagnetic torque and its harmonic analysis are determined. The results show that the use of parallel branches of the stator winding in machines with high torque values and static eccentricity increases the vibration activity of the motor and the likelihood of overheating of the stator winding due to the occurrence of equalizing currents. The study showed that the use of parallel winding branches in large synchronous machines should be avoided, since this leads to increased vibrations and a decrease in machine reliability.

Key words: synchronous machine, permanent magnets, eccentricity, torque pulsations, parallel branches, numerical modeling.

References

1. Pop, C. V. Noise and vibrations analysis of a permanent magnet synchronous machine for light electric vehicle / C. V. Pop, O. Birte, D. Fodorean // 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). – 2017. – P. 1–5.

2. Shubov, I. G. Noise and vibration of electrical machines / I. G. Shubov. – 2nd ed., revised and enlarged. – Leningrad : Energoatomizdat. Leningrad branch, 1986. – 208 p. : ill.

3. The eccentricity of a permanent magnet synchronous machine rotor / V. Ya. Bepalov, M. Ye. Kovarsky, A. O. Sidorov [et al.] // Elektrichestvo. – 2018. – No. 12. – P. 34–40.

4. Effect of Rotor Eccentricity in Large Synchronous Machines / M. Michon, R. C. Holehouse, K. Atallah [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – Vol. 50. – No. 11. – P. 1–4.

Vyacheslav Valer'evich Magin, head of laboratory.

Maxim Borisovich Panasyuk, lead engineer.

Т. 8 (495) 365-26-14.

(JC «VNIEM Corporation»).

Danila Andreevich Khnychev, master's student, engineer, e-mail: danila.khnychiiov@mail.ru.

(JC «VNIEM Corporation»; National Research University «Moscow Power Engineering Institute»).