

Identification of Internal Electromagnetic Defects of Implicit-Pole Synchronous Generators Based on the Information of its External Magnetic Field

Morozov A.N., Kazakov Ju.B., Morozov N.A., Nesterov S.A.
Ivanovo State Power Engineering University,
Ivanovo, Russian Federation

Abstract. The objectives of the work are to develop a non-contact method of detecting internal electromagnetic defects in synchronous generators based on the analysis of asymmetry of the external magnetic field distribution resulting from damage, establishing the relationship of defects of a generator with the pattern of field distribution, identifying diagnostic signs for the defects. These objectives are achieved by developing and using three-dimensional finite-element models of the external magnetic field of synchronous generators, by studying and analyzing the results of numerical simulation of external magnetic fields, by comparing the simulation results with experimental data. Significant results of the work include the improvement of the non-contact method for detecting internal electromagnetic defects in synchronous generators, revealing how defects of the generator manifest themselves in the asymmetry of magnetic field distribution, and detecting the correlation of field asymmetry with the type and severity of defects. For implicit-pole synchronous generators, it is reasonable to use the field asymmetry coefficient determined by the shift in the magnetic field distribution caused by field coils damage. The sign of the coefficient indicates the pole with a damaged field coil. The value of the coefficient characterizes the severity of damage to the field coils, with a critical value of 0.1. The significance of the results lies in the possibility of timely and non-contact diagnostics of internal electromagnetic defects of implicit-pole synchronous generators, which can significantly reduce the economic damage from failures of generators without installation of diagnostic sensors of damage inside the generators.

Keywords: synchronous generators, electromagnetic defects, external magnetic field, numerical simulation, asymmetry of magnetic field distributions, defect diagnosis, non-contact method.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.03>

UDC: 62-185.7

Identificarea defectelor electromagnetice interne în generatoarele sincrone cu poli implicați cu utilizarea câmpului magnetic extern

Morozov A.N., Kazakov Ju.B., Ju.B. Morozov Ju.B., Nesterov S.A.
Universitatea Energetică de Stat din Ivanovo,
Ivanovo, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării este elaborarea unei metode non-contact pentru detectarea defectelor electromagnetice interne în generatoarele sincrone, bazată pe analiza asimetriei distribuției câmpului magnetic extern, ce apare la deteriorarea, stabilirea legăturii dintre defectele generatorului și naturii distribuțiilor câmpului, identificarea proprietăților diagnostice ale defectelor, tipul și gradul de deteriorare. Scopul este atins prin elaborarea și utilizarea modelelor cu elemente finite de volum 3D ale câmpului magnetic extern al generatoarelor sincrone cu capacitatea de a simula defectele electromagnetice, cercetarea și analiza rezultatelor simulării numerice a câmpurilor magnetice externe și distribuțiile acestora și compararea rezultatelor simulării cu datele experimentale. Rezultate importante ale lucrării sunt elaborarea unei metode non-contact pentru identificarea defectelor electromagnetice interne ale generatoarelor sincrone, natura manifestării defectelor generatorului în asimetria distribuției câmpului magnetic, corelarea asimetriilor câmpului cu tipul și gradul de defecte. S-a stabilit că pentru generatoarele sincrone cu poli implicit este oportună utilizarea factorului de asimetrie a câmpului, care este determinat de deplasarea distribuției câmpului magnetic atunci când bobinele de excitație sunt deteriorate. Semnul coeficientului indică polul cu deteriorare a bobinelor de înfășurare de câmp. Valoarea coeficientului indică gradul de deteriorare a bobinelor înfășurării câmpului, valoarea critică a coeficientului este mai mare de 0,1. Semnificația rezultatelor constă în posibilitatea diagnosticării în timp util și fără contact a defectelor electromagnetice interne ale generatoarelor sincrone cu poli non-solient, care pot reduce semnificativ daunele economice cauzate de defecțiunile generatorului fără a instala senzori de diagnosticare de deteriorare în interiorul structurii generatorului. **Cuvinte-cheie:** generatoare sincrone, defecte electromagnetice, câmp magnetic extern, modelare numerică, asimetrie a distribuțiilor câmpului magnetic, diagnosticarea defectelor, metodă non-contact.

Идентификация по внешнему магнитному полю внутренних электромагнитных дефектов неявнополюсных синхронных генераторов

Морозов А.Н., Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Нестеров С.А.

ФГБОУВО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
г. Иваново, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является разработка бесконтактного метода выявления внутренних электромагнитных дефектов в синхронных генераторах на основе анализа возникающих при повреждениях несимметричности распределения внешнего магнитного поля, установление взаимосвязей дефектов генераторов с характером распределений полей, выявление диагностических признаков дефектов, вида и степени повреждений. Поставленная цель достигается путем разработки и использования полнообъемных 3D конечноэлементных моделей внешнего магнитного поля синхронных генераторов с возможностью имитации электромагнитных дефектов, исследования и анализа результатов численного моделирования внешних магнитных полей и их распределений, сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными. Важными результатами работы является развитие бесконтактного метода идентификации внутренних электромагнитных дефектов синхронных генераторов, характер проявления дефектов генераторов в несимметричности распределения магнитного поля, корреляции несимметрий поля с видом и степени дефектов. Установлено, что для неявнополюсных синхронных генераторов целесообразно использование коэффициента несимметрии поля, определяемого смещением распределения магнитного поля при повреждении катушек обмотки возбуждения. Знак коэффициента указывает полюс с повреждением катушек обмотки возбуждения. Значение коэффициента указывает степень повреждения катушек обмотки возбуждения, критично значение коэффициента более 0,1. Значимость результатов состоит в возможности своевременной и бесконтактной диагностики внутренних электромагнитных дефектов неявнополюсных синхронных генераторов, что позволяет существенно сократить экономический ущерб от выходов их строя генераторов без установки диагностических датчиков повреждений внутри конструкции генераторов.

Ключевые слова: синхронные генераторы, электромагнитные дефекты, внешнее магнитное поле, численное моделирование, несимметрия распределений магнитного поля, диагностика дефектов, бесконтактный метод.

ВВЕДЕНИЕ

Дефекты в синхронных генераторах (СГ), в том числе в крупных неявнополюсных СГ (НЯСГ), должны достоверно диагностироваться как можно раньше, так как последствия аварий вследствие дефектов СГ могут быть существенными [1-4]. В 2016 г. экономический ущерб от аварийных выходов неявнополюсных турбогенераторов (ТГ) для одного из холдингов генерирующих компаний ЕЭС России составил порядка 1,5 млрд. руб., в среднем 3 млн. руб. за день простоя. Важно раннее обнаружение дефектов СГ, так как начальные штрафы достигают 0,8 млн. руб. за первые 4 часа аварии.

Заблаговременная подача уведомлений Системному оператору о неисправности СГ позволяет экономить до 2,5 млн. руб. в день при внеплановом ремонте.

Отказы СГ могут быть обусловлены внутренними электромагнитными повреждениями обмоток якоря (ОЯ), возбуждителя с обмоткой возбуждения (ОВ), магнитопровода. Существует потребность в достоверном прогнозировании технического состояния СГ, своевременном выявлении повреждений.

Определение внутренних электромагнитных повреждений СГ может осложняться комплексным проявлением сразу нескольких дефектов и их скрытыми причинно-следственными связями. Перспективно развитие внешних бесконтактных методов диагностики внутренних электромагнитных дефектов СГ.

При работе СГ вокруг его создается внешнее электромагнитное поле (ВЭМП), в котором могут проявляться возникающие повреждения [5-7]. Натурные эксперименты показывают возможность бесконтактного измерения ВЭМП на корпусе СГ с учетом его экранирования.

В СГ результирующее магнитное поле создается токами в обмотках ротора и статора, что отражается и в распределении ВЭМП. В исправной электрической машине в симметричных режимах работы круговая диаграмма амплитуд магнитной напряженности ВЭМП однородна, симметрична с учетом временного характера изменения электромагнитных полей. Электромагнитные повреждения ОВ и ОЯ, элементов магнитопровода приводят к электрическим и магнитным несимметричностям, симметрия распределения ВЭМП нарушается, изменяется спектр временных и пространственных гармоник ВЭМП. Несиммет-

рии распределения ВЭМП СМ могут быть выявлены и использованы как диагностический признак её состояния. При развитии дефектов растут амплитуды высших гармоник ВЭМП. По разработанным методикам становится возможным определять вид неисправности, оценивать дефекты на ранней стадии развития, степень повреждений. Это дает возможность использовать анализ ВЭМП в неразрушающих методах диагностики работоспособности ЭМ.

Применять анализ ВЭМП для диагностики дефектов электрических машин предложено относительно недавно и использовали его в основном для определения дефектов в асинхронных двигателях [8-14]. В работах [15, 16] предложены метод выявления диагностического признака виткового замыкания в ОВ в роторе явнополюсных СГ, основанный на обработке сигнала, полученного от индукционного датчика ВЭМП. Метод основывается на дифференциальном принципе измерения с двух датчиков поля рассеяния ВЭМП и выделения субгармонической из однополярного сигнала датчиков, установленных в торцевой зоне. Обоснована зависимость между степенью несимметрии ВЭМП, вызванного витковым замыканием, и величиной сигнала датчика. Разработано устройство, определяющее величину несимметрии ВЭМП.

В [17] показано как используется постоянный мониторинг ВЭМП для обнаружения зарождающихся неисправностей СМ на основе анализа эволюции частотных спектров. По измерениям ВЭМП оценивают изменение размеров воздушного зазора, величину эксцентриситета, определяют межвитковые замыкания обмоток, повреждение изоляция листов стали.

Уточненный анализ распределений ВЭМП СГ целесообразно осуществлять с использованием современных программных комплексов численного моделирования электромагнитных полей. Необходимо применение численных моделей ВЭМП СГ с электромагнитными дефектами. Требуется исследование ВЭМП СГ с повреждениями, характера распределений ВЭМП, изменения величин несимметрий ВЭМП, установление взаимосвязей поврежденных СГ с несимметриями ВЭМП, обоснование диагностических характеристик повреждений, составление методик, алгоритмов и программ выявления вида и степени электромагнитных дефектов. В связи с этим развитие бес-

контактной диагностики внутренних электромагнитных дефектов СГ по распределению ВЭМП является актуальной научно-технической задачей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанные на основе аналитических и численных методов компьютерные модели НЯСГ с наличием электромагнитных дефектов позволили выполнять расчёты распределений ВЭМП, исследовать проявления повреждений без изготовления опытных образцов СГ. Нахождение взаимосвязей между неисправностью, степенью повреждения СГ и искажениями ВЭМП легли в основу разработки алгоритмов диагностики электромагнитных дефектов.

Численное решение дифференциальных уравнений Максвелла для электромагнитного поля в СГ осуществлялось методом конечных элементов.

При создании модели задавалась конфигурация магнитопроводов и зубцово-пазовых зон, обмоточные данные, размеры и расположение лобовых частей обмоток статора и ротора, конструктивные элементы корпуса и подшипниковых щитов, шихтовка, характеристики намагничивания материалов, их электропроводности, другие параметры.

Разработаны и использованы 2D и 3D полевые модели СГ, позволяющие анализировать ВЭМП СГ в разных режимах нагрузки, при повреждениях ОВ и ОЯ и магнитопровода разной степени развития. Предварительный анализ показал, что для диагностики электромагнитных повреждений ТГ необходимо использование 3D моделей ВЭМП.

В 2D модели возможен учет токов в пазовой части обмоток ЭМ. Для полноценного анализа работы ЭМ с повреждениями в обмотках статора и ротора или при несимметричной нагрузке использование 2D модели не корректно. Электромагнитные поля при таких повреждениях, особенно для ЭМ с малым числом пар полюсов, корректно моделировать только в 3D пространстве с учетом лобовых частей.

Выбрана модель ТГ - НЯСГ с $2p = 2$, имеет на роторе 12 пазов и два больших зуба каждый в два зубцовых деления. Обмотка статора трехфазная, двухслойная, число пазов на полюс и фазу $q = 4$, $f_1 = 50$ Гц. Ротор выполнен сплошным из стали Ст3.

На рис. 1 показана объёмная модель НЯСГ и её поперечное сечение. Северный и южный

полюсы обозначены N и S. Каждому полюсу соответствуют три катушки ОБ: ближние к большому зубу, образующих «полюсные наконечники», обозначены 1pN и 1pS; следующие катушки ОБ – 2pN и 2pS, лежащие практически на экваторе ротора по оси Y катушки – 3pN и 3pS.

Лобовые части обмоток быстроходных ($2p = 2$) НЯСГ, имеют большой вылет и занимают большее пространство, чем для ЭМ с $2p > 4$. В двухполюсной машине токи в лобовых эле-

ментах для каждого полюсного деления охватывают половину окружности, 180° . Поэтому в двухполюсных НЯСГ нельзя пренебрегать лобовыми частями ОЯ при анализе распределений ВЭМП при отсутствии повреждений обмоток и, тем более, при их наличии. В режиме ХХ распределение ВЭМП имеет ярко выраженное объёмное распределение. Анализ распределений ВЭМП следует проводить не только по модулям векторов магнитной индукции, но и её составляющих: радиальной, осевой и тангенциальной [18].

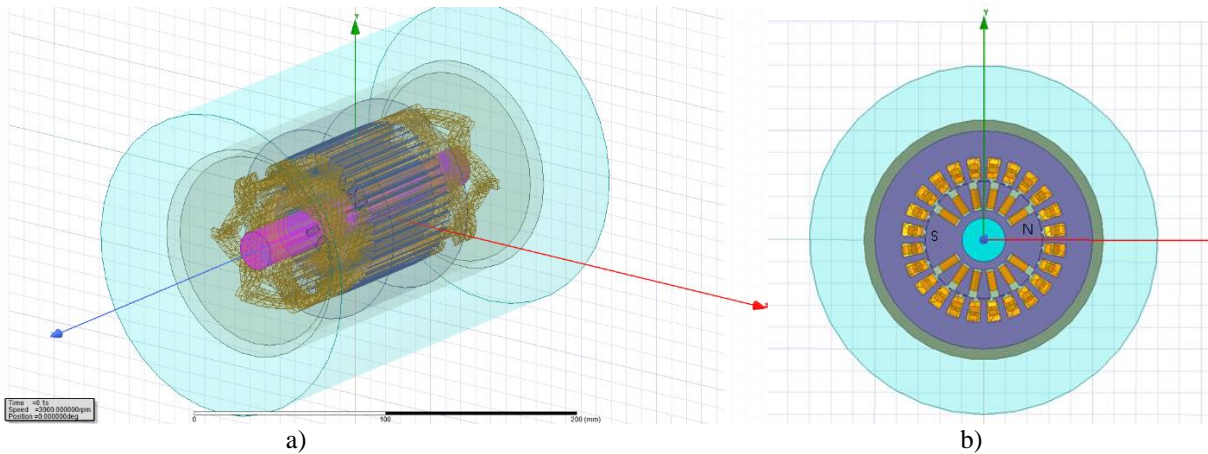


Рис. 1. Расчётная 3D модель (а) неявнополюсного СГ и ее поперечное сечение (б).

Fig. 1. A 3D model (a) for simulation of implicit-pole synchronous generator and its cross-section (b).

Пространственное распределение ВЭМП делает невозможным визуальный анализ, анализ ВЭМП проводим по частям: по продольным и поперечным сечениям, по составляющим цилиндрических координат: радиальной, осевой и тангенциальной. На рис. 2 представлены точки контроля ВЭМП на продольной модели неявнополюсного СГ вдоль оси машины. Схематично показаны лобовые части ОБ и ОЯ. Точка 1 находится на поперечном

сечении посередине длины машины, точки 3 и 13 над торцами сердечника статора, точки 2 и 12 над центрами половин сердечника статора относительно точек 1-3 и 1-13, точки 5 и 15 над осью кольцевой части корзины лобовых частей ОЯ, точки 10-9-11 и 20-19-21 лежат в плоскостях, отступающих от подшипниковых щитов на 5 мм. Точки внутри корпуса служат для контроля правильности распределения ВЭМП.

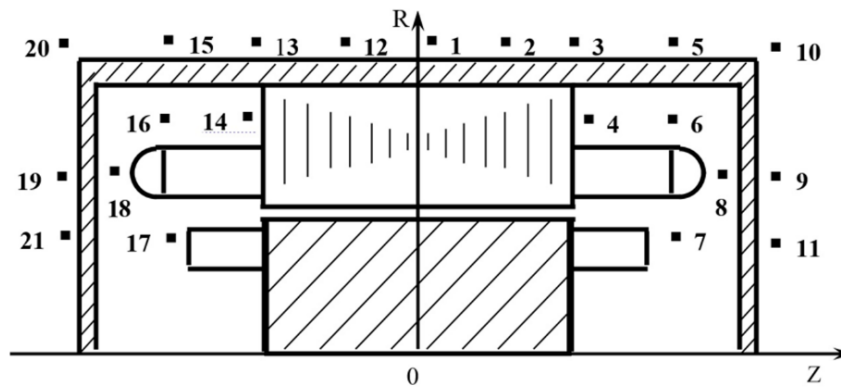


Рис. 2. Точки контроля внешнего магнитного поля.

Fig. 2. The points of control of the external magnetic field.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В режиме XX без электромагнитных повреждений распределение ВЭМП симметрично относительно магнитной оси машины – линии по диаметру ротора от полюса N к полюсу S в поперечном сечении посередине

длины машины. На рис. 2 это сечение обозначено 1. На рис. 3 представлено распределение индукции ВЭМП в векторном изображении в режиме XX. При нагрузке распределение ВЭМП меняется (рис. 4). Магнитный поток становится асимметричным относительно осей машины.

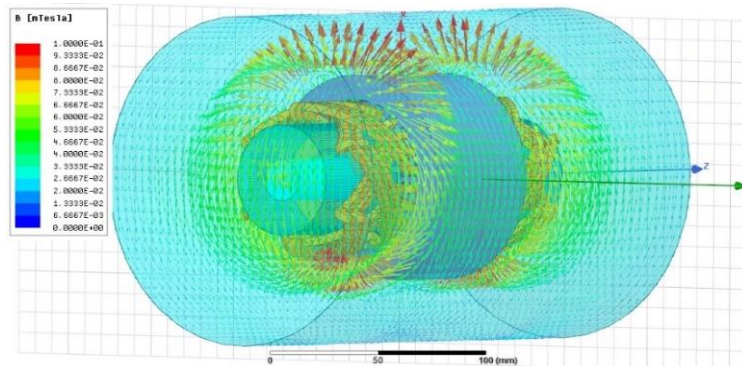


Рис. 3. Распределение индукции ВЭМП в векторном изображении в режиме XX.

Fig. 3. Distribution of the induction of the external magnetic field in the vector image in the no-load mode.

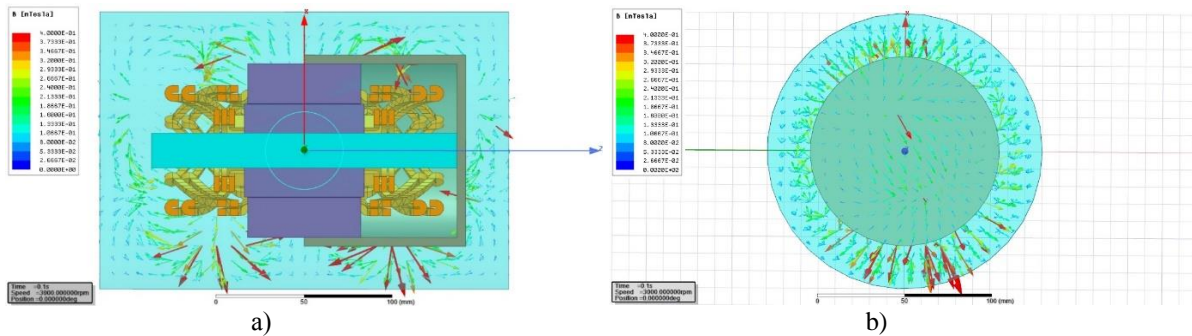


Рис. 4. Распределение индукции ВЭМП при активной нагрузке в продольном (а) и поперечном сечении (б).

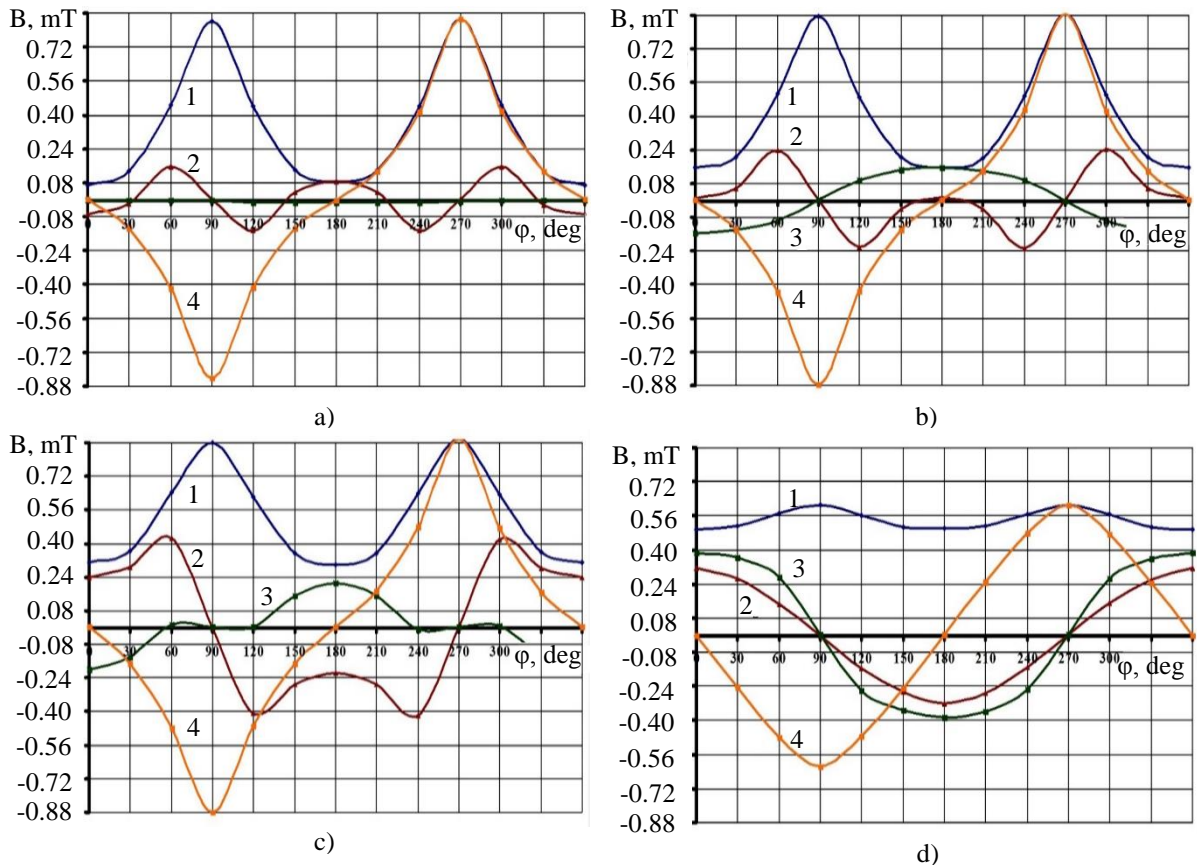
Fig. 4. Distribution of the induction of the external magnetic field at an active load in the longitudinal section (a) and cross section (b).

Результаты моделирования ВЭМП представлены изменениями магнитной индукции в зависимости от угла. За нулевое значение угла принято положение над вершиной большого зуба полюса N. На рис. 5 представлены изменения модуля и составляющих ВЭМП в разных сечениях НЯСГ.

Из анализа распределений индукции ВЭМП следует, что в режиме XX наиболее информативна тангенциальная составляющая вектора магнитной индукции. Радиальная составляющая, которую обычно и измеряют при исследовании ВЭМП ЭМ, в сечении 1 проявляется слабо, но в сечениях 3 и 5 становится хорошо фиксируемой. В сечении 3 и сечении 5, далеко выходящем за пределы сердечника статора, заметную роль играет осевая состав-

ляющая, которая в других сечениях проявляется слабо. Таким образом, в режиме XX везде ярко проявляется тангенциальная составляющая индукции; радиальная составляющая в сечении 1 не велика, но хорошо фиксируется в сечениях 3 и 5; осевая составляющая хорошо заметна в сечениях 3 и 5. Однако, значение модуля магнитной индукции в сечении 5, не превышает 70 % максимального значения модуля индукции в сечениях по сердечнику статора.

В полномасштабной компьютерной модели НЯСГ при данных $2p = 2$, $z_2' = 16$, $z_2 = 12$, $\gamma = 0,75$ высшие пространственные гармоники МДС ОБ выражены относительно амплитуды первой гармоники незначительно: третья гармоника v_3 не превышает 3,5 %, пятая гармоника v_5 – 2,0 %, седьмая гармоника v_7 – 2,5 %.



a – сечение 1; b – сечение 2; c – сечение 3; d – сечение 5.

1 – модуль; 2 – радиальная, 3 – осевая и 4 – тангенциальная составляющие.

Рис. 5. Изменение модуля магнитной индукции ВЭМП и её составляющие в режим XX.

a - section 1; b - section 2; c - section 3; d - section 5.

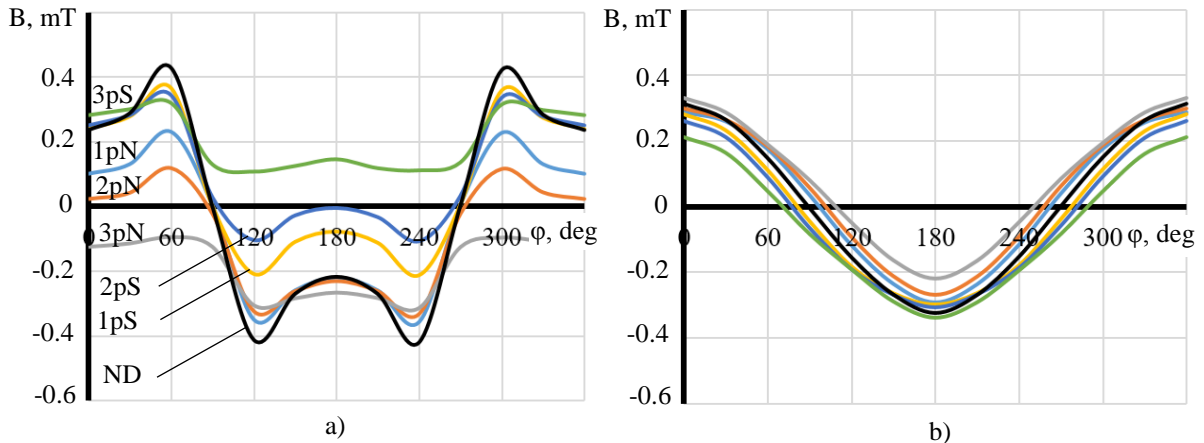
1 - magnitude; 2 – radial component, 3 – axial component, 4 - tangential component.

Fig. 5. Variation of the magnitude of the magnetic induction and its components in no-load mode.

Повреждение ОВ НЯСГ имитировалось отключением одной из катушек ОВ. В результате магнитное поле ротора искажалось, что проявлялось в распределении ВЭМП регулярным образом в разных сечениях. Отключение одной катушки ОВ при работающих других катушках ведёт к системному изменению радиальной составляющей индукции ВЭМП. Последовательное отключение катушек ОВ под полюсом **N**: **1pN**, **2pN** и **3pN**; уменьшает в сечении **3** радиальную составляющую индукции в области полюса **N** в диапазоне углов 90° – 270° и почти не влияет на неё в области полюса **S** в том же диапазоне углов. Отключение катушек ОВ под полюсом **S**: **1pS**, **2pS** и **3pS**; заметно проявляется в диапазоне этих углов у полюса **S** и мало заметно в диапазоне углов полюса **N**. Чем дальше от большого зуба расположена отключаемая катушка ОВ, тем сильнее выражено отсутствие её НС в создании магнитного поля. На рис. 6 представлены графики изменения радиальной составляющей индукции ВЭМП в

сечениях **3** и **5** в режиме XX при повреждении одной из катушек ОВ. Аббревиатурой **ND** обозначен график без повреждения катушек. На рис. 7 представлены графики изменения осевой, а на рис. 8 тангенциальной составляющих индукций ВЭМП в сечениях 3 и 5 в режиме XX при повреждении одной из катушек ОВ.

Как и для радиальной составляющей, последовательное повреждение катушек ОВ от большого зуба к экватору сечения ротора ведёт к большему отклонению индукции ВЭМП от графика изменения индукции **ND**. Повреждение «северных» катушек ведёт к снижению положения графиков, а повреждение «южных» катушек – к повышению их относительно графика **ND**. В обоих сечениях повреждение заметнее проявляется под одноимённым полюсом. Для тангенциальных составляющих действие «северных» и «южных» катушек оказывается одинаковым.

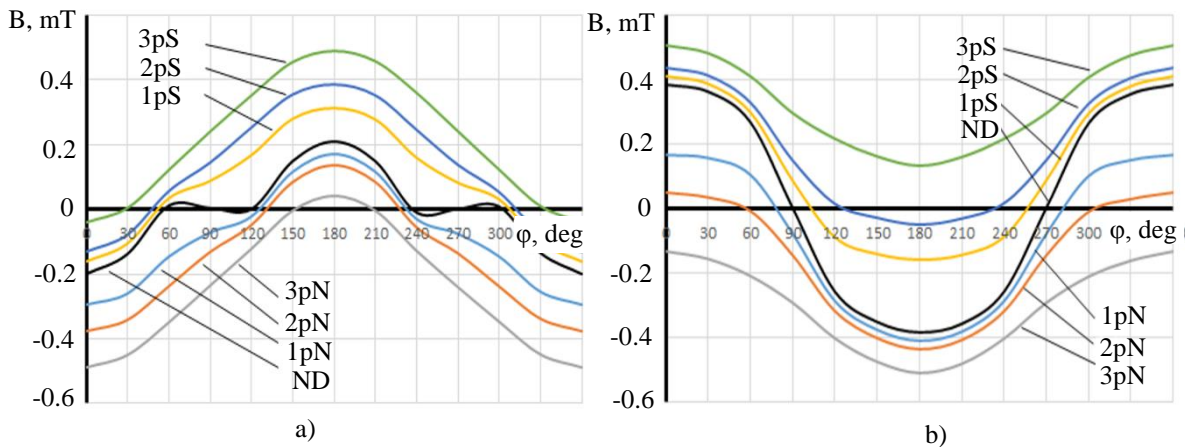


a – сечение 3; b – сечение 5

Рис. 6. Радиальные составляющие индукции при повреждениях катушек ОБ в режиме XX.

a - section 3; b - section 5

Fig. 6. Radial components of induction when the field coils are damaged, no-load mode.

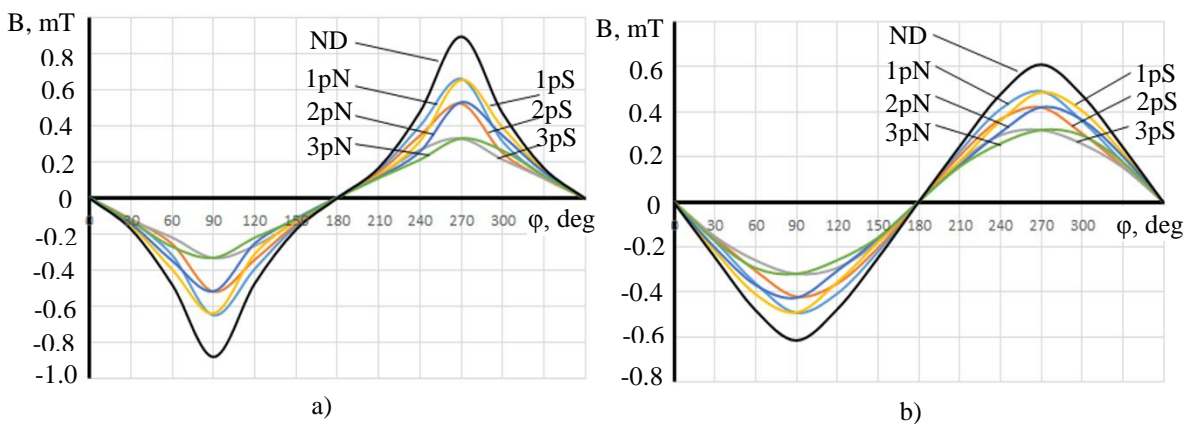


a – сечение 3; b – сечение 5

Рис. 7. Осевые составляющие индукции при повреждениях катушек ОБ в режиме XX.

a - section 3; b - section 5

Fig. 7. Axial components of induction when the field coils are damaged, no-load mode.



a – сечение 3; b – сечение 5

Рис. 8. Тангенциальные составляющие индукции при повреждениях катушек ОБ в режиме XX.

a - section 3; b - section 5

Fig. 8. Tangential components of induction when the field coils are damaged, no-load mode.

Повреждение катушек ОБ НЯСГ искажает симметричное распределение магнитного поля в машине. При повреждении катушки ОБ графики распределения намагничивающей силы (НС) катушек ОБ смещаются по оси ординат относительно графиков распределения НС катушек ОБ для режима без повреждений. Чем ближе к экватору ротора находится катушка ОБ, тем больший магнитный поток она создаёт, и тем дальше от оси абсцисс смещается график распределения НС при повреждении катушки.

При диагностике повреждения катушки ОБ НЯСГ по внешнему магнитному полю предлагается использовать числовой критерий несимметричности распределения магнитного поля – коэффициент несимметрии поля (КНП) [67]. Примем КНП как отношение среднего значения индукции B_{CP} к размаху изменения (пульсации) индукции $B_{П}$ (рис. 9)

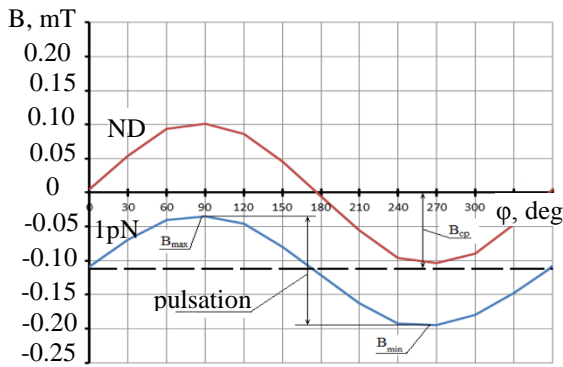


Рис. 9. К определению коэффициента несимметрии поля (КНП)

Fig. 9. Determination of the field asymmetry coefficient

$$КНП = \frac{B_{CP}}{B_{П}} = \frac{B_{max} + B_{min}}{B_{max} - B_{min}}$$

где $B_{CP} = \frac{B_{max} + B_{min}}{2}$, $B_{П} = \frac{B_{max} - B_{min}}{2}$

Здесь B_{max} – максимальное и B_{min} – минимальное значения составляющей индукции ВЭМП.

Такое представление упрощает пользование данными.

КНП информативен именно для НЯСГ с $2p = 2$, у которых повреждение одной катушки ОБ носит не локальный характер, как у многополюсных явнополюсных СГ, а влияет на распределение магнитного поля вокруг всего СГ. Очевидно, что при отсутствии повреждений ОБ изменения составляющих индукций практически симметричны относительно оси абсцисс и имеют КНП близкий к нулю. Отличие

КНП от нуля определяется ошибкой расчёта и фиксации составляющей индукции.

Повреждение одной катушки ОБ нарушает симметрию магнитного поля, что проявляется в изменении значений КНП [19]. Так как повреждение катушки ОБ одного полюса НЯСГ смещает графики изменения составляющих индукций в разные стороны от оси абсцисс, то знаки КНП будут указывать полюс, в котором произошло повреждение катушки ОБ. Графики изменения тангенциальных составляющих индукции при повреждении катушек ОБ остаются симметричными относительно оси абсцисс, тогда анализ изменения КНП для них не информативен. Анализ изменения составляющих магнитного поля на корпусе НЯСГ по значениям КНП показывает их эффективность.

Для оценки результатов теоретических исследований и компьютерного моделирования на основе АД 4ААМ63В2 разработана физическая модель НЯСГ с $2p = 2$ и возможностью имитации повреждения катушек ОБ. Ротор изготовлен на 16 зубцовых делений с 12 реальными пазми. Каждый большой зуб составляет два зубцовых деления. Обмотка ротора выполнена проводом $d = 0,68$ мм, всего шесть катушек, по три катушки на полюс по десять витков каждая. В одном конце вала выполнены канавки для вывода концов катушек ОБ (рис. 10). На валу установлен коммутатор и контактные кольца, на которые через щётки подаётся регулируемое напряжение возбуждения. Концы катушек ОБ выведены на коммутатор с переключателем (П) (рис. 11). Путём перепаивания концов можно отключить любую катушку ОБ.

На поверхности корпуса отмечены точки фиксации составляющих индукции ВЭМП. Для уменьшения вибрации ротор соединён с валом токоприёмных колец гибким валом.

Сравнение результатов расчёта и эксперимента (рис. 12) показывают их качественную сходимость. При повреждении катушек возбуждения магнитное поле НЯСГ становится несимметричным, что отражается в характеристиках ВЭМП.

В режиме ХХ радиальные составляющие индукции ВЭМП в точках 1 и 3 в эксперименте больше расчётных в 1,2–1,4 раза.

В тоже время в точках 5 и 11 экспериментальные значения радиальной составляющей индукции ВЭМП достигают только 0,64–0,84 от расчётных значений.



Рис. 10. Ротор модели неявнополюсного синхронного генератора

Fig. 10. A rotor for the model of implicit pole synchronous generator

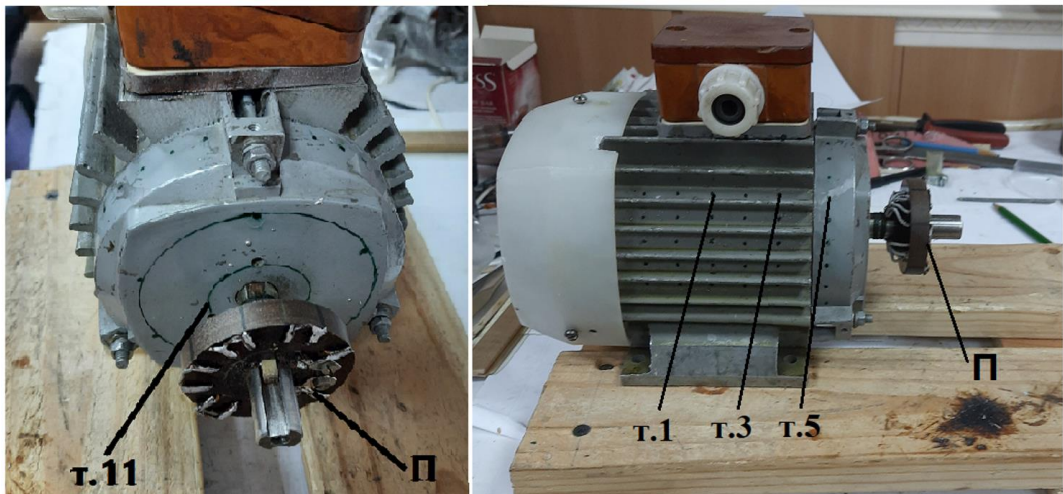
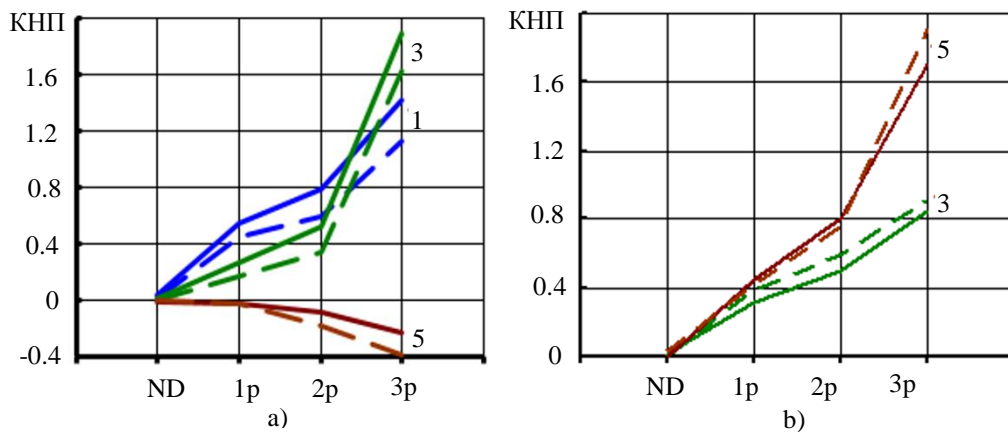


Рис. 11. Переключатель катушек ОБ и положение контрольных точек

Fig. 11. Excitation coil switch and positions of control points

При этом наибольшие значения радиальной составляющей фиксируются в точках 3 и

11 по результатам расчёта и при проведении эксперимента.



а – для радиальных составляющих индукции в т.1, 3 и 5; б – для осевых составляющих в т.3 и 5. сплошные линии – расчёт; штриховые – эксперимент.

Рис. 12. КНП при повреждении х катушек обмотки возбуждения, режим ХХ

а - for radial components of induction at points 1, 3, and 5; б - for axial components at points 3 and 5. solid lines for simulations; dashed lines for experiments.

Fig. 12. Field asymmetry coefficient for field coil faults in no-load mode

Значения тангенциальных составляющих индукции ВЭМП в режиме XX во всех точках в 1,5–2,0 раза меньше расчётных, что может быть вызвано наличием рёбер охлаждения на модели, которые должны заметно влиять на распределение тангенциальной составляющей индукции ВЭМП вихревыми токами в них. Осевая составляющая ВЭМП наиболее чётко фиксируется в точке 5. У поверхности подшипникового щита в точке 11 она проявляется слабее, магнитный поток по радиальному направлению проходит к другому полюсу и мало отклоняется внутрь машины. Данные в точке 1 не могут быть использованы для анализа повреждений катушек ОБ. Согласно расчёту значения осевых составляющих индукции ВЭМП в этой точке должны быть близки к нулю, а эксперимент не может гарантировать попадание в точку симметрии.

Результаты экспериментов подтверждают возможность использования коэффициента несимметрии поля (КНП) для выявления неисправности катушек ОБ НЯСГ.

Выводы.

Предложен бесконтактный метод выявления внутренних электромагнитных дефектов синхронных генераторов на основе анализа возникающих несимметрий внешнего магнитного поля.

Установлено, что в целях совершенствования метода диагностики электромагнитных повреждений ОБ НЯСГ целесообразно использование коэффициента несимметрии поля (КНП), определяемого по смещению распределения магнитного поля при повреждении катушек ОБ относительно распределения поля без повреждения ОБ. По мере изменения положения повреждённой катушки ОБ от большого зуба к экватору ротора КНП возрастает. Знак КНП показывает, в сторону какого полюса смещается распределение поля при повреждении катушек ОБ. Значение КНП указывает на степень повреждения катушек ОБ, критично значение более 0,1. Изменение нагрузки не влияет на выявляемость повреждённой катушки ОБ по анализу КНП. Таким образом, контроль радиальной и осевой составляющих ВЭМП, значения КНП превышающие $\pm 0,1$, позволяют выявлять повреждения катушки ОБ НЯСГ и локализовать повреждённую катушку на роторе машины.

Литература (References)

- [1] Alekseev B.A. *Opređenje sostoyaniya (diagnostika) krupnykh gidrogeneratorov: Obzor otechestvennogo i zarubezhnogo opyta* [Determination of Condition (Diagnostics) of Large Hydrogenerators: Review of Domestic and Foreign Experience]. Moscow, 2001. 144 p.
- [2] Glebov I.A., Karpov G.V., Kharlamova E.F. *Issledovanie elektromagnitnykh poley v gidrogeneratorakh* [Investigation of electromagnetic fields in hydrogenerators]. St. Petersburg, 2005. 341p.
- [3] Gol'dberg O.D., Makarov L.V., Khelemskaya S.P. *Inzhenernoe proektirovanie elektricheskikh mashin* [Engineering design of electrical machines]. Moscow, 2016. 546 p.
- [4] Lazarev G.B., Samorodov Yu.N. [Emergency of generators and synchronous electric motors. New problems.] *Sb. dokladov nauch.-tekhn. konf. «Aktual'nye voprosy i perspektivy razvitiya elektromashinostroeniya»* [Proc. of the Scientific and Technical Conference "Actual Problems and Prospects of Development of Electric Machine Building"] Moscow, 2015, pp. 35-42. (In Russian).
- [5] Brynskiy E.A., Danilevich Ya.B., Yakovlev V.I. *Elektromagnitnye polya v elektricheskikh mashinakh: uchebnyk dlya vuzov* [Electromagnetic Fields in Electrical Machines: Textbook for Higher Education Institutions]. Leningrad, 1979. 176p.
- [6] Epremyan A.V. K voprosu diagnostirovaniya sinkhronnykh mashin po ikh vneshnemu magnitnomu polyu [On the diagnosis of synchronous machines by their external magnetic field]. *Izvestia vuzov. Electromechanics*, 1999, no.4, pp. 7-9.
- [7] Zhumangulov K.K. *Vneshnie magnitnye polya elektromekhanicheskikh preobrazovateley elektrotekhnicheskikh kompleksov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [External magnetic fields of electromechanical converters of electrical complexes. Dr. technical sci. diss.]. Almaty, 2006. 253 p.
- [8] Novoselov E.M., Savel'ev V.A., Skorobogatov A.A., Strakhov A.S., Sulynenkov I.N. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya radial'noy sostavlyayushchey vneshnego magnitnogo polya v tselyakh diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigateley* [Evaluation of the possibility of using the radial component of the external magnetic field to diagnose asynchronous motors]. *Vestnik IGEU*, 2018, no.3, pp. 38-46.
- [9] Novoselov E.M. *Razrabotka metoda funktsional'noy diagnostiki obmotki rotora asinkhronnykh elektrodvigateley sobstvennykh nuzhd elektrostansiy po vneshnemu magnitnomu polyu*. Diss. kan. tekhn. nauk [Development of method of functional diagnostics of rotor winding of asynchronous electric auxiliary motors of power plants by external magnetic field. Dr. technical. sci. diss.]. Ivanovo, 2018. 234 p.
- [10] Khayrullin I.Kh., Pashali D.Yu. *Diagnostika elektromekhanicheskikh preobrazovateley po vneshnemu magnitnomu polyu* [Diagnostics of

- electromechanical transducers by external magnetic field]. *Vestnik UGATU*, 2006, no.1(14), pp. 165-170.
- [11] Cuevas M., Romary R., Lecointe J., Jacq T. Non-Invasive Detection of Rotor Short-Circuit Fault in Synchronous Machines by Analysis of Stray Magnetic Field and Frame Vibrations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, Vol. 52, N. 7.
- [12] Irhoumah M., Pusca R., Lefevre E., Mercier D., Romary R., Demian C. Information fusion with belief functions for detection of inter-turn short-circuit faults in electrical machines using external flux sensors. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2018, Vol. 65, No 3, pp. 2642–2652.
- [13] Kazakov Yu.B., Morozov A.N., Gulyaev I.V. Simulative Asymmetry of the External Electromagnetic Field in the Case of Damage to Synchronous Generators. *Russian Electrical Engineering*, 2019, Vol. 90, Issue 1, pp 11–16.
- [14] Negrea M.D. Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines: Doctoral Dissertation. Helsinki University of Technology, 2006. 140 p.
- [15] Polishchuk V.I. *Razvitie teorii postroeniya sistem diagnostiki sinkhronnykh mashin*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of the theory of synchronous machine diagnostic systems. Dr. technical sci. diss.]. Samara, 2016. 294 p.
- [16] Polishchuk V.I., Vasil'eva Yu.Z. Razrabotka sposobov vyyavleniya vitkovogo замыкания v obmotke возбуждения синхронной машины [Development of a method for detecting a winding closure in a synchronous machine excitation winding]. *Nauchnoe obozrenie*, 2014, no.12, pp. 55-59.
- [17] Ehya, H., Nysveen A. Pattern Recognition of Interturn Short Circuit Fault in a Synchronous Generator Using Magnetic Flux. *IEEE Transactions on industry applications*, 2021, Vol. 57, N. 4, pp. 3573–3581.
- [18] Kokko V. Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements: Academic Dissertation. Oulu, Finland, 2003. 101 p.
- [19] Morozov, A.N. [Field asymmetry coefficient at failures of excitation winding of implicitly pole synchronous machine]. *Mater. mezhdun. n.-t. konf. "Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii" (XXI Benardosovskie chteniya)* [Mater. of international conference "State and prospects of electrical and thermal technology" (XXI Benardosovsky readings)]. Ivanovo, 2021, pp. 196-198. (In Russian).

Сведения об авторах.



Морозов Александр Николаевич, аспирант кафедры Электромеханики Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

E-mail: elmash@em.ispu.ru



Морозов Николай Александрович, к.т.н., доцент, доцент кафедры Электромеханики Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

E-mail: elmash@em.ispu.ru



Казakov Юрий Борисович, д.т.н., профессор, профессор кафедры Электромеханики Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

E-mail: elmash@em.ispu.ru



Нестеров Сергей Александрович, к.т.н., и.о. заведующего кафедрой Электромеханики Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

E-mail: elmash@em.ispu.ru