

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.84

### МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПО ИЗМЕНЕНИЯМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ю.Б. КАЗАКОВ<sup>1</sup>, А.Н. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, А.П. ОКЕАНСКИЙ<sup>1</sup>, Е.А. ШУМИЛОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
г. Иваново, Российская Федерация<sup>2</sup>ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет» филиал в г. Сызрани,  
г. Сызрань, Российская Федерация

E-mail: elmash@em.ispu.ru; shumilov\_e\_a@mail.ru

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Своевременная диагностика работоспособности синхронных генераторов снижает ущерб электростанций от их отказов. Внешние электромагнитные поля синхронных генераторов создаются электромагнитными процессами в элементах синхронных генераторов. Поэтому повреждения в синхронных генераторах будут вызывать изменение внешних электромагнитных полей. Существуют системы регистрации внешних электромагнитных полей синхронных генераторов, их изменений, но отсутствуют математические модели изменения внешних электромагнитных полей при повреждаемости элементов синхронных генераторов. В связи с этим актуальным является поиск математически обоснованных взаимосвязей между дефектами синхронных генераторов и изменением внешних электромагнитных полей.

**Материалы и методы.** Использован метод конечных элементов. Модельный анализ внешних электромагнитных полей синхронных генераторов 538 кВт выполнен для режимов холостого хода, активной, индуктивной и емкостной нагрузок при дефектах в обмотке возбуждения, обмотке якоря с учетом демпфирующего действия корпуса при синхронной частоте вращения ротора.

**Результаты.** Разработан метод диагностики дефектов синхронных генераторов на основе анализа результатов конечно-элементного моделирования внешних электромагнитных полей и их изменений. Установлено, что наибольшее изменение внешних электромагнитных полей при повреждении обмотки возбуждения возникает при активно-индуктивной нагрузке: при 25 %-ном витковом замыкании обмотки возбуждения одного полюса индукция над соседними полюсами возрастает на 90 %; при 50 %-ном замыкании – на 235,6 %; при 75 %-ном замыкании – на 416 %. Обрыв параллельной ветви обмотки якоря приводит к разным по амплитуде распределениям индукции внешних электромагнитных полей во времени на корпусе синхронных генераторов. Проведены измерения внешних электромагнитных полей работающего исправного синхронного генератора, подтвердившие наличие внешних электромагнитных полей. Дефекты элементов синхронных генераторов вызывают изменение внешних электромагнитных полей. Повреждение обмотки возбуждения полюса приводит к увеличению индукции внешних электромагнитных полей в области других полюсов. Дефект обмотки якоря проявляется в отличии амплитуд распределений индукции внешних электромагнитных полей во времени в разных точках на корпусе. Предложен метод диагностики повреждений элементов синхронных генераторов по изменению его внешних электромагнитных полей.

**Выводы.** Предложенный метод диагностики дефектов синхронных генераторов позволяет по изменениям внешнего электромагнитного поля определять виды и степень повреждения обмоток статора и ротора синхронных генераторов.

**Ключевые слова:** синхронные генераторы, дефекты обмотки возбуждения, обмотка якоря, диагностика синхронных генераторов, внешние электромагнитные поля, конечно-элементное моделирование

## METHOD FOR DIAGNOSTICS OF SYNCHRONOUS GENERATOR DEFECTS BY CHANGES OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD

Yu.B. KAZAKOV<sup>1</sup>, A.N. MOROZOV<sup>1</sup>, A.P. OKEANSKY<sup>1</sup>, E.A. SHUMILOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

<sup>2</sup>Syzran Branch of Samara State Technical University, Syzran, Russian Federation

E-mail: elmash@em.ispu.ru; shumilov\_e\_a@mail.ru

### Abstract

**Background.** Timely diagnostics of synchronous generator (SG) performance reduces the damage to power plants from their failures. Electromagnetic processes in the elements of SG create external electromagnetic fields (EEMF) of SG. Therefore, damage to the SG will cause a change in EEMF. There are systems for registering EEMF of SG, their changes, but there are no mathematical models simulating EEMF changes when SG elements are damaged. The aim of the work is to find mathematically grounded interrelationships between SG defects and EEMF changes.

**Materials and methods.** The finite element method is used. Model analysis of EEMF of 538 kW SG is done for idle mode, active, inductive and capacitive loads with defects in the field winding, armature winding, taking into account the damping action of the case at a synchronous rotor speed.

**Results.** A method has been developed for diagnosing SG defects by analyzing the results of finite-element simulation of EEMF and their changes. The greatest change in EEMF when the field winding is damaged has been found to occur with active-inductive load: at a 25 % inter-winding fault of the field coil of one pole, the induction over the neighboring poles increases by 90 %; at a 50 % fault by 235,6 %; at a 75% fault – by 416 %. The break of the parallel branch of the armature winding leads to different amplitude EEMF induction distributions over time on the SG case. The measurements of the EEMF of a working healthy SG have confirmed EEMF presence. Defects of SG elements cause changes in EEMF. Damage to the pole field coil leads to an increase in the EEMF induction in the region of other poles. The defect of the armature winding can be detected by the difference between the amplitudes of the EEMF induction distributions over time at different points on the case. A method for diagnosing damage to the elements of SG by measuring changes in EEMF has been proposed.

**Conclusions.** The proposed method of synchronous generator defect diagnostics allows determining the types and degree of synchronous generator stator and armature winding damage by changes in the external electromagnetic field.

**Key words:** synchronous generators, field coil defects, armature winding, diagnostics of synchronous generators, external electromagnetic fields, finite element simulation

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.055-061

**Введение.** К синхронным генераторам (СГ) предъявляются высокие требования по надежности и безотказности в работе. Важно раннее выявление дефектов. Вывод СГ во внеплановый ремонт сопровождается экономическим ущербом, ведет к штрафам и снижению прибыли от реализации электроэнергии. В 2016 г. ущерб от штрафных санкций при аварийном выходе из строя СГ только по пяти станциям составил 360 млн рублей, а в 2017 г. – 450 млн рублей. Каждый день простоя генерирующего оборудования по штрафам обходится станциям от 1,7 до 2,3 млн рублей, не считая затрат на ремонт. Каждое аварийное отключение стоит от 32 до 60 млн рублей. Заблаговременное определение возникающих и развивающихся дефектов СГ позволяет экономить от 1 до 2,5 млн рублей в день, даже при неплановом ремонте [1, 2]. Существует настоятельная потребность в достоверном и своевременном выявлении повреждаемости синхронных машин [3, 4].

Делаются попытки диагностирования внутренних повреждений электрических машин на основе анализа проявляющихся внешних признаков. Одним из важнейших источников

состояния электрооборудования являются их внешние электромагнитные поля (ВЭМП), которые распространяются в пространстве. ВЭМП несут в себе информацию о состоянии электрических машин, являются важным и доступным источником сведений о работоспособности и/или аварийности электрооборудования [5–8].

Для электрических машин возможно измерение ВЭМП датчиками, например датчиками Холла, (рис. 1,а), так как интенсивность ВЭМП СГ может быть достаточна для уверенной регистрации (рис. 1,б) с дальнейшей цифровой обработкой и спектральным анализом, по которым может быть определен вид дефекта и оценена степень его развития [9].

Обычно проводят измерение результирующих ВЭМП или составляющих магнитной индукции – осевых, радиальных и тангенциальных. Но так как ВЭМП могут вызываться одновременно обмотками возбуждения (ОВ) и якоря (ОЯ), демпферной обмоткой, пазовыми и лобовыми частями обмоток с наличием влияния бандажных цилиндров ротора и колец ОЯ, то затрудняется выделение влияния отдельных элементов СГ на результирующее ВЭМП.

При измерении ВЭМП необходимо учитывать экранирование их проводящим корпусом. Методика прогнозирования остаточного ресурса отсутствует, диагностические параметры, характеризующие процессы развития дефектов, исследованы слабо. Все это создает трудности для выявления полезного диагностирующего сигнала и правильной интерпретации результатов измерений [10, 11].

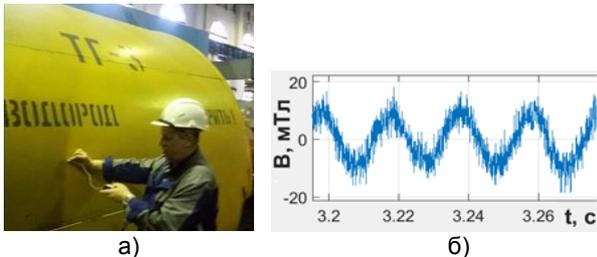


Рис. 1. Измерение датчиком Холла ВЭМП на корпусе турбогенератора ТВО-32УЗ Ивановской ТЭЦ-2: а – процесс измерения; б – индукция ВЭМП частоты 50 Гц

Необходим поиск функциональных взаимосвязей между состоянием объекта и характеристиками сигналов ВЭМП в целях обоснования диагностических признаков дефектов, например, на основе формализованных математических моделей. Но к настоящему времени математические модели ВЭМП при дефектах (электромагнитных несимметриях статора и ротора СГ) не развиты. В связи с этим целесообразно проведение математического модельного анализа изменения ВЭМП при повреждаемости СГ и выявление дефектов СГ на основании изменения ВЭМП.

**Теоретическое обоснование.** В основе теоретического выявления дефектов синхронных генераторов по изменению внешнего электромагнитного поля лежит моделирование ВЭМП СГ при численном решении дифференциальных уравнений Максвелла:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J}; \operatorname{div} \vec{B} = 0; \operatorname{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \\ \vec{J} &= \gamma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}); \vec{B} = \mu(H) \vec{H}; \vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{J}$  – векторы индукции, напряженностей магнитного и электрического полей, плотности тока;  $\gamma$  – электропроводность;  $\mu(H)$  – магнитная проницаемость среды;  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал.

Причиной распространения ВЭМП за пределы СГ является насыщение ярма сердечника статора. При повреждаемости СГ, различных дефектах в ОВ и ОЯ происходит перераспределение токов по областям, изменение насыщения элементов магнитной системы, возникают магнитные несимметрии. Решение (1) с измененными данными приведет к изменению

распределения ВЭМП, что позволяет связать дефекты СГ с изменением их ВЭМП.

**Методы и модели.** Для решения уравнений магнитного поля (1) в двумерной постановке  $(x, y)$  для момента времени  $t$  использован метод конечных элементов программного комплекса ANSYS Maxwell. При численном решении минимизируется «энергетический» функционал

$$Q = \iint_{xy} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 \right) + \gamma \left( A \frac{\partial A}{\partial t} \right) - jA \right] dx dy. \quad (2)$$

На основе определенной временной зависимости индукции возможно определение объемной плотности энергии ВЭМП, воздействующей на датчик:

$$w_R = \frac{\mu_0}{2} \int_0^T B_R^2(t) dt, \quad (3)$$

где  $B_R(t)$  – временная зависимость изменения индукции ВЭМП в точке  $R$ , определенная с корректной дискретизацией по пространственной и временной координатам.

Для исследования и моделирования выбран явнополюсный синхронный генератор мощностью 538 кВт с 6 полюсами (рис. 2). Индукция ВЭМП фиксировалась на расстоянии 10 мм от корпуса машины ( $d_1, \dots, d_6$  – точки фиксации индукции).

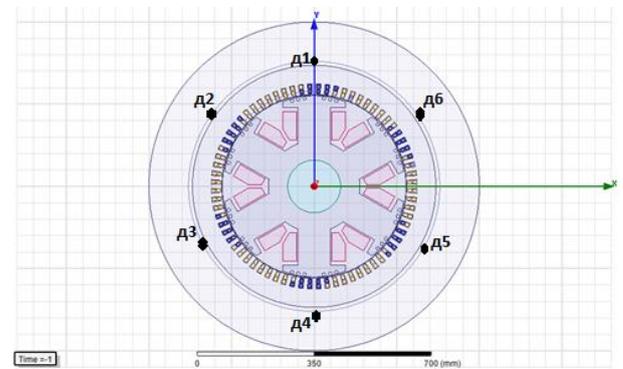


Рис. 2. Расчетная модель СГ

Сформирована численная конечно-элементная модель СГ. В области ВЭМП сетка конечных элементов формировалась наиболее мелкими элементами. Моделирование выполнялось для режимов холостого хода (ХХ) и нагрузки, когда создавалась внешняя цепь с подключением резисторов, индуктивностей и емкостей. Их значения соответствовали номинальной нагрузке при  $\cos \varphi = 1$  или 0,8. Проведено моделирование ВЭМП СГ при различных дефектах в ОВ и ОЯ (обрыв одной из трех параллельных ветвей обмотки), характерах

нагрузки. Режим совместных неисправностей – обрыв параллельной ветви ОЯ и частичное витковое замыкание ОВ одного из полюсов – реализовывался путем сочетания в модели обоих режимов. Выполнено моделирование ВЭМП СГ с учетом влияния демпфирования металлического немагнитного корпуса машины с электропроводностью  $10 \cdot 10^6$  См/м. Моделирование выполнялось при синхронной частоте вращения ротора.

**Результаты.** Выполнено расчетное исследование и анализ ВЭМП СГ в разных режимах. В результате сравнения объемной плотности энергии электромагнитного поля внутри и вне СГ (рис. 3) подтверждено, что магнитная энергия в рабочем зазоре внутри СГ на несколько порядков выше, чем вне машины. Диагностический сигнал с датчика вне машины намного слабее, чем внутри машины.

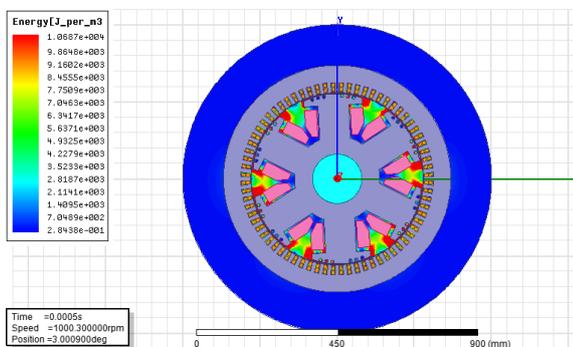


Рис. 3. Распределение объемной плотности энергии электромагнитного поля внутри и вне СГ

В отличие от работы СГ без дефектов, при которых ВЭМП распределены симметрично (рис. 4,а), распределение ВЭМП при дефектах, например, ОВ одного из полюсов становится несимметричным (рис. 4,б).

По результатам моделирования оценивалось влияние изменения намагничивающей силы ОВ одного из полюсов, обрыва ветви ОЯ, наличие проводящего корпуса на распределение индукции ВЭМП.

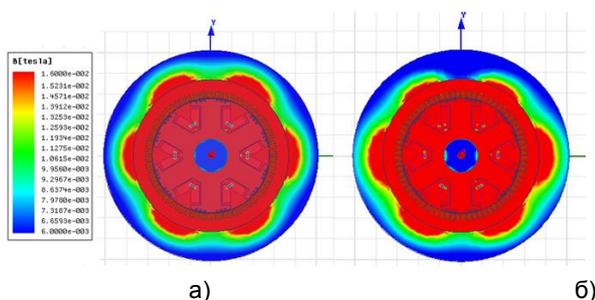


Рис. 4. Распределение индукции ВЭМП СГ в режиме ХХ: а – ОВ без повреждения; б – повреждено 50 % витков в ОВ одного из полюсов

В режиме холостого хода дефект в ОВ одного из полюсов приводит к изменению индукций ВЭМП в области всех полюсов. Уменьшение магнитодвижущей силы (МДС) полюса вызывает снижение индукции ВЭМП над этим полюсом до 0,76 % на каждый 1 % снижения МДС полюса. Магнитные поля над полюсами другой полярности также уменьшаются, но незначительно, не более 0,1 % на каждый процент снижения МДС поврежденного полюса. При этом магнитные поля над одноименными полюсами растут, что делает возможным сравнение их значений и выделение результата как диагностического признака. Значения магнитной индукции ВЭМП находятся в диапазоне от 5 до 38 мТл, что уверенно фиксируется датчиками Холла и может быть зарегистрировано в одной точке на корпусе. На рис. 5 приведено распределение индукции ВЭМП во времени: без неисправностей ОВ, при 25, 50 и 75 %-ном снижении МДС одного из полюсов ОВ.

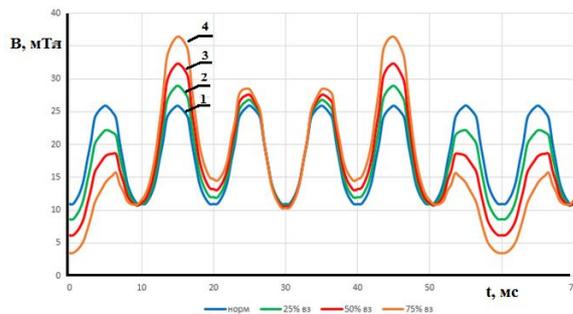


Рис. 5. Временное изменение индукции ВЭМП в точке д1 (рис. 2) СГ в режиме ХХ: 1 – ОВ без повреждения; 2 – 25 % снижение МДС ОВ одного из полюсов; 3 – 50 % снижение МДС полюса; 4 – 75 % снижение МДС полюса

Между точками д2 и д3 (рис. 2) индукция выросла при 25 %-ном снижении МДС ОВ полюса 1 на 11,5 %, при 50 %-ном снижении МДС ОВ полюса 1 – на 25 %, при 75 %-ном снижении МДС ОВ полюса 1 – на 40 %, по сравнению с режимом без неисправностей ОВ. Аналогично для точек д5 и д6. В точках д3 и д5 индукция выросла при 25 %-ном снижении МДС ОВ полюса 1 на 9,1 %, при 50 %-ном снижении – на 18 %, при 75 %-ном снижении МДС ОВ полюса 1 – на 33 %. Между точками д3 и д4 индукция выросла при 25 %-ном снижении МДС ОВ полюса 1 на 2,9 %, при 50 %-ном снижении МДС ОВ полюса 1 – на 5,8 %, при 75 %-ном снижении МДС ОВ полюса 1 – на 8,7 %.

Такие данные позволяют по изменению индукции ВЭМП в режиме ХХ реализовать метод выявления дефекта полюса – степень снижения МДС ОВ (рис. 6).

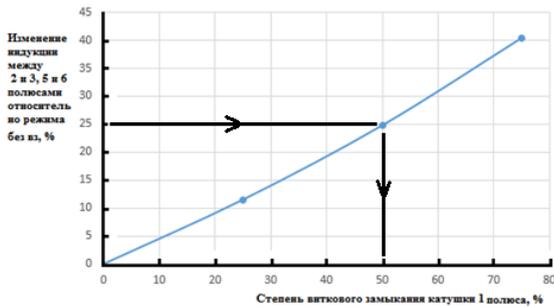


Рис. 6. Изменение индукции между точками д2 и д3 (или между д5 и д6) относительно исправного состояния в режиме XX в зависимости от процента снижения МДС ОВ полюса 1

При симметричной нагрузке ОЯ СГ и исправной ОВ распределение ВЭМП будет симметричным с шестью волнами по окружности сердечника (СГ имеет 6 полюсов), но из-за действия реакции якоря смещенным по угловой координате относительно режима XX. Зависимости индукции от времени, снятые в разных точках на статоре, имеют схожий характер, но сдвинутые во времени. При индуктивной нагрузке реакция якоря оказывает размагничивающее действие, а при емкостной нагрузке – намагничивающее действие. Это приводит к тому, что насыщение сердечника статора меняется и изменяется величина ВЭМП. Так, при работе СГ в режиме XX амплитуда индукции ВЭМП составляет 25,5 мТл (рис. 5), при работе СГ в автономном режиме с номинальной активной нагрузкой – 7 мТл, при индуктивной нагрузке – 4,5 мТл, а при емкостной нагрузке – 34 мТл. Характер нагрузки существенно влияет на изменение индукции между точками д2 и д3 (или между д5 и д6) по отношению с исправным состоянием ОВ в зависимости от степени снижения МДС ОВ полюса 1 (рис. 7). При активно-индуктивной нагрузке диагностический признак дефекта ОВ одного из полюсов – изменение индукции между точками д2 и д3 (или между точками д5 и д6) – наиболее выражен. По величине его изменения можно судить о степени дефекта ОВ полюса СГ. Таким образом, дефекты ОВ лучше всего проявляются при активно-индуктивной нагрузке.

При исправной ОВ, но при дефекте в ОЯ, например при замыкании нескольких витков в одной из фаз ОЯ, лежащих в соответствующих пазах, индукция ВЭМП на поверхности статора будет изменяться во времени волнообразно, но с разными амплитудами полувольт, так как амплитуда МДС фазы с дефектом снижается. На рис. 8 показано, что метод анализа чувствителен даже при незначительных дефектах ОЯ. Так, при замыкании трех витков одной из фаз ОЯ СГ и номинальной активной нагрузке

амплитуды волн индукции ВЭМП неравны и составляют 6,4 и 7,2 мТл.

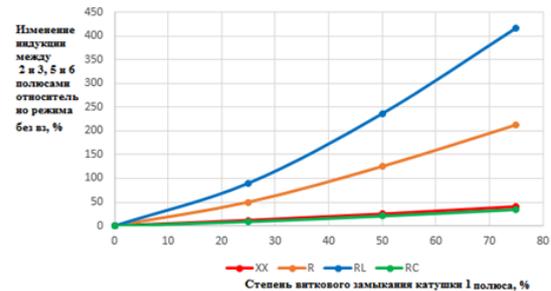


Рис. 7. Изменение индукции между точками д2 и д3 (или между д5 и д6) относительно исправного состояния в зависимости от процента снижения МДС ОВ полюса 1

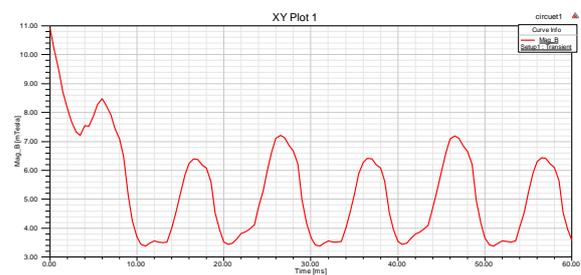


Рис. 8. Временное изменение индукции ВЭМП СГ при исправной ОВ и номинальной активной нагрузке с трехвитковым замыканием в одной фазе ОЯ

При существенном дефекте ОЯ, например обрыве одной из трех параллельных ветвей, и при активно-индуктивной нагрузке индукция ВЭМП по окружности сердечника изменяется несимметрично с двумя наиболее выраженными волнами с амплитудой от 2,5 до 11 мТл. Так как ОЯ неподвижна в пространстве, то по кривой, снятой с одного неподвижного датчика, нельзя определить место ее неисправности. Нужно использовать несколько распределенных вокруг машины датчиков ВЭМП.

Наличие корпуса из проводящего материала демпфирует ВЭМП, снижает в несколько раз, но интенсивность ВЭМП остается достаточной для фиксации дефектов (рис. 9).

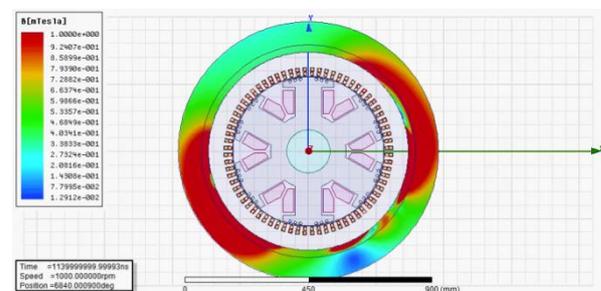


Рис. 9. Распределение индукции ВЭМП СГ при одновременных дефектах в ОВ и ОЯ с учетом демпфирования ВЭМП корпусом

**Выводы.** Дефекты элементов синхронных генераторов вызывают изменение внешнего электромагнитного поля. Анализ их изменений позволяет выявлять дефекты синхронных генераторов.

Предложенный метод диагностики поврежденных элементов СГ по изменению его ВЭМП позволяет по изменениям ВЭМП определять виды и степень повреждения обмоток статора и ротора СГ.

#### Список литературы

1. Лазарев Г.Б., Самородов Ю.Н. Аварийность генераторов и синхронных электродвигателей. Новые проблемы // Сб. докл. науч.-техн. конф. «Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроения» 3 декабря 2015 г. / АЭН РФ. – М.: ОАО «ВНИИКП», 2015. – С. 35–42.
2. Самородов Ю.Н. Турбогенераторы. Аварии и инциденты: техн. пособие. – М.: Элекс-КМ, 2008. – 488 с.
3. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Диагностика турбогенераторов // АН СССР. ВНИИ Электромашиностроения. – Л.: Наука, 1989. – 118 с.
4. Алексеев Б.А. Определение состояний (диагностика) крупных турбогенераторов: Обзор отечественного и зарубежного опыта. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
5. Внешние электромагнитные поля электродвигателей и способы их снижения / Ю.Б. Казаков, Е.А. Шумилов, А.В. Тамьяров, А.Н. Морозов. – Иваново, 2017. – 116 с.
6. Хайруллин И.Х., Пашали Д.Ю. Диагностика электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю // Вестник УГАТУ. – 2006. – Т. 7, № 1(14). – С. 165–170.
7. Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля / А.Ю. Алексеенко, О.В. Бродский, В.Н. Веденеев и др. // ВЕСТНИК АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2006. – № 2. – С. 9–13.
8. Оценка возможности использования радиальной составляющей внешнего магнитного поля в целях диагностики асинхронных электродвигателей / Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.А. Skorobogatov и др. // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 3. – С. 38–46.
9. Полищук В.И., Васильева Ю.З. Разработка способа выявления виткового замыкания в обмотке возбуждения синхронной машины // Научное обозрение. – 2014. – № 12. – С. 55–59.
10. Yaghobi H., Ansari K., Mashhadi H. Rajabi. Analysis of Magnetic Flux Linkage Distribution in Salient-Pole Synchronous Generator with Different Kinds of Inter-Turn Winding Faults // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. – 2011. – Vol. 7, № 4. – P. 260–272.
11. Казаков Ю.Б., Морозов А.Н., Океанский А.П. Диагностика электромагнитных несимметрий по внешнему полю электрических машин // Материалы V Всеросс. науч.-техн. конф. «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электро-

технологий» (ПЭЭЭ-2017) / ФГБОУВО «Тольяттинский гос. ун-т». – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – С. 376–380.

#### References

1. Lazarev, G.B., Samorodov, Yu.N. Avarynost' generatorov i sinkhronnykh elektrodvigateley. Novye problemy [Failure rate in generators and synchronous electric drives. New issues]. *Sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye voprosy i perspektivy razvitiya elektromashinostroeniya»* [Proceedings of the scientific and technical conference «Modern issues and prospects for development in electric machine industry»]. Moscow: OAO «VNIIPK», 2015, pp. 35–42.
2. Samorodov, Yu.N. *Turbogeneratory. Avarii i intsidenty* [Turbogenerators. Accidents and incidents]. Moscow: Eleks-KM, 2008. 488 p.
3. Glebov, I.A., Danilevich, Ya.B. Diagnostika turbogeneratorov [Diagnostics of turbogenerators]. *AN SSSR. VNIIElektromashinostroeniya* [Academy of Sciences of the USSR. All-Union Research and Development Institution of Electric Machine Industry]. Leningrad: Nauka, 1989. 118 p.
4. Alekseev, B.A. *Opredelenie sostoyaniy (diagnostika) krupnykh turbogeneratorov: Obzor otechestvennogo i zarubezhnogo opyta* [Determination (diagnostics) of large turbogenerators conditions: A review of the Russian and foreign experience]. Moscow: Izdatel'stvo NTs ENAS, 2001. 152 p.
5. Kazakov, Yu.B., Shumilov, E.A., Tam'yarov, A.V., Morozov, A.N. *Vneshnie elektromagnitnye polya elektrodvigateley i sposoby ikh snizheniya* [External electromagnetic fields of electric drives and methods of their reduction]. Ivanovo, 2017. 116 p.
6. Khayrullin, I.Kh., Pashali, D.Yu. Diagnostika elektromekhanicheskikh preobrazovateley po vneshnemu magnitnomu polyu [Diagnostics of electromechanical transducers by external magnetic field]. *Vestnik UGATU*, 2006, vol. 7, no. 1(14), pp. 165–170.
7. Alekseenko, A.Yu., Brodskiy, O.V., Vedeneev, V.N., Tonkikh, V.G., Khomutov, S.O. Diagnostika i prognozirovaniye sostoyaniya asinkhronnykh dvigateley na osnove ispol'zovaniya parametrov ikh vneshnego elektromagnitnogo polya [Diagnostics and prediction of induction motor conditions based on the parameters of their external electromagnetic field]. *VESTNIK AltGTU im. I.I. Polzunova*, 2006, no. 2, pp. 9–13.
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 [Estimation of the possibility of using the radial component of external magnetic field for induction motor diagnostics]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 3, pp. 38–46.
9. Polishchuk, V.I., Vasil'eva, Yu.Z. Razrabotka sposoba vyyavleniya vitkovogo zamykaniya v obmotke vozbuзhdeniya sinkhronnoy mashiny [Development of the method of localizing inter-winding faults in field coils of induction motors]. *Nauchnoye obozrenie*, 2014, no. 12, pp. 55–59.
10. Yaghobi, H., Ansari, K., Mashhadi, H. Rajabi. Analysis of Magnetic Flux Linkage Distribution in Salient-Pole Synchronous Generator with Different Kinds of In-

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.