

Анализ магнитного поля ротора турбогенератора при наличии витковых замыканий в обмотке возбуждения

КУЗНЕЦОВ Д.В.

Рассмотрены проблемы обнаружения и локализации витковых замыканий в обмотке возбуждения работающего турбогенератора. Приведены результаты аналитического расчета и спектрального анализа магнитного поля ротора при наличии витковых замыканий в различных катушках обмотки возбуждения. Для наиболее эффективного обнаружения местоположения дефектной катушки по спектру магнитного поля в зазоре между ротором и статором необходимо учитывать информацию о начальных фазах четных гармонических составляющих поля.

Ключевые слова: турбогенератор, обмотка возбуждения, витковые замыкания, спектральный анализ, магнитное поле

В турбогенераторах с непосредственным водородным и воздушным охлаждением обмотки возбуждения возможность прямого доступа к виткам через вентиляционные каналы в пазовой и лобовых частях создает опасность нарушения изоляции из-за попадания внутрь посторонних металлических частиц (стружки, опилок и т.п.), пыли и влаги. Витковая изоляция существенно тоньше корпусной, и вероятность ее повреждения выше. При работе генератора в месте замыкания витков происходит значительное тепловыделение, что со временем может привести к повреждению корпусной изоляции и оплавлению меди витков.

Практический интерес представляет контроль состояния межвитковой изоляции при вращающемся роторе, когда обмотка возбуждения находится под действием нормальных эксплуатационных нагрузок (центробежных и термомеханических сил), так как в период останова генератора в случае неустойчивого замыкания дефект может устраниться и без вмешательства со стороны ремонтного персонала — за счет снятия указанных нагрузок.

Известен ряд методов выявления витковых замыканий на работающей машине, использующих в качестве диагностических параметров:

Problems concerned with revealing and localizing turn-to-turn short-circuit faults in the field winding of a running turbine generator are considered. Results from analytic calculation and spectral analysis of the rotor magnetic field in case of turn-to-turn short-circuit faults in different coils of the field winding are presented. To ensure the most efficient location of the faulty coil from the spectrum of magnetic field in the gap between the rotor and stator, it is necessary to take into account information about the initial phases of the even harmonic components of the field.

Key words: turbine generator, field winding, turn-to-turn short circuit faults, spectral analysis, magnetic field

полное сопротивление обмотки ротора переменному току [1];

разницу между измеренным значением тока возбуждения и его расчетным значением, найденным по диаграмме Потье [2];

циркуляционные токи частотой 100 Гц, протекающие в контурах параллельных ветвей фаз обмотки статора, для чего последние оснащаются магнитными поясами Роговского [2, 3];

ЭДС, индуцируемую полями рассеяния пазов ротора в датчике, установленном на внутренней поверхности статора [3];

ЭДС четных гармонических составляющих (100, 200 Гц и т.д.) в спектре сигнала датчика, устанавливаемого на внутренней поверхности статора [4].

Основным недостатком метода [1], основанного на измерении полного сопротивления обмотки переменному току, является отсутствие возможности определения местоположения дефектной катушки. В [2] предлагается определять местоположение дефекта по соотношению между значением 2-й гармоники циркуляционного тока и изменением 1-й гармоники МДС ротора. Приведенная в [2] формула для расчета изменения МДС неточна — она представляет собой 1-ю гармонику МДС закор-

10. Гуляев И.В., Тутаев Г.М., Маняев И.В. Влияние частоты возбуждения на энергетические характеристики асинхронизированного вентиляционного двигателя. — Изв. ТулГУ. Технические науки, 2010, вып. 3, ч. 2.

[11.09.13]

Автор: Тутаев Геннадий Михайлович окончил факультет электроники и автоматики Мордовского

государственного университета (МГУ) им. Н.П. Огарёва в 1986 г. В 2002 г. защитил кандидатскую диссертацию в Нижегородском государственном техническом университете. Доцент кафедры электроники и нанoeлектроники МГУ им. Н.П. Огарёва.

ченной части витков и справедлива лишь для случая, когда ток возбуждения до и после замыкания поддерживается неизменным. Необходимо заметить, что в дальнейшем, применяя данный метод на практике, автор меняет точку зрения и отождествляет изменение МДС уже с изменением тока возбуждения, вызванным уменьшением сопротивления обмотки при закорачивании витков.

В действительности изменение 1-й гармоники МДС возбуждения складывается из двух составляющих:

$$DF_1 = DF_{1DI} - DF_{1кз}, \quad (1)$$

где DF_{1DI} – 1-я гармоника МДС исправной обмотки при протекании по ней тока DI , равного разнице между значениями тока возбуждения в исправном $I_{исп}$ и неисправном $I_{деф}$ состояниях; $DF_{1кз}$ – 1-я гармоника МДС замкнутой части витков при протекании по ним тока $I_{деф}$.

Поскольку параметры обмотки дефектной катушки априори не известны, то определение $DF_{1кз}$, а соответственно и DF_I , в реальных условиях невозможно и, следовательно, указанный способ локализации короткозамкнутых витков не пригоден для практического применения.

Метод диагностики, описанный в [3], позволяет определять не только факт наличия дефекта, но и его местоположение. Он основан на измерении ЭДС, наводимой полями рассеяния пазов ротора в катушке, размещаемой на поверхности расточки статора. Диагностическим признаком дефекта является уменьшение сигнала датчика вследствие уменьшения потока рассеяния над пазом с дефектной катушкой по сравнению с остальными пазами. Если сталь зубцов не насыщена, то изменение потока пазового рассеяния не зависит от местоположения замкнутых витков по высоте паза. В то же время в реальных условиях чувствительность метода непостоянна и зависит от режима работы. С увеличением тока возбуждения возрастает степень насыщения зубцов ротора, поэтому чем ближе место замыкания к дну паза, т.е. чем дальше от датчика располагаются замкнутые витки, тем ослабление поля рассеяния менее выражено.

Метод, описанный в [4], также предполагает исследование поля ротора с помощью индукционных датчиков, но в отличие от предыдущего способа диагноз устанавливается по результатам анализа спектра магнитного поля. Диагностическим признаком виткового замыкания является наличие в спектре сигнала гармоник, четных по отношению к частоте сети. В случае появления четных составляющих в спектре сигнала датчика местоположение неисправной катушки определяется сравнени-

ем относительных значений и частот четных гармонических с каноническим составом магнитного поля. При сравнении используются либо расчетный спектр, либо спектр поля исправного генератора.

Практическая реализация данного метода сопряжена с определенными трудностями технологического и эксплуатационного характера. Вследствие различия коэффициентов затухания отдельных пространственных гармоник магнитного поля в области зазора соотношение между их амплитудными значениями существенно зависит от радиальной координаты. В то же время из-за неизбежных случайных отклонений, возникающих при центровке ротора в процессе монтажа генератора и при установке индукционных датчиков, невозможно жестко выдерживать расстояние между датчиком и поверхностью ротора. Таким образом, даже в случае однотипных машин необходимо формирование индивидуальных канонических форм спектров для каждого генератора в отдельности. Иначе говоря, применяемый подход не допускает использования единой системы количественных критериев, в том числе и для генераторов одного и того же типа и одинаковой мощности.

Таким образом, для надежного выявления и локализации места виткового замыкания по спектру магнитного поля ротора следует использовать такие диагностические параметры, которые не зависели бы от расстояния между датчиком и ротором, что требует проведения дополнительных уточняющих исследований.

Математическая модель. В элементах магнитной цепи турбогенератора поле рассчитывается аналитически, при создании математической модели приняты следующие допущения:

вследствие большой протяженности активной зоны генератора в осевом направлении магнитное поле принимается плоскопараллельным;

пазовые токи ротора (или статора) заменяются сосредоточенными линейными токами, которые размещаются в области немагнитного зазора у поверхности соответствующего магнитопровода, влиянием вихревых токов в активных и конструктивных элементах пренебрегаем;

математическая модель – линейная, магнитные проницаемости зубцов и ярм статора и ротора считаются постоянными;

сердечники статора и ротора модели – гладкие, немагнитный зазор – равномерный, влияние зубчатости учитывается путем введения эквивалентных значений длины воздушного зазора и магнитных проницаемостей зубцов статора и ротора;

различием магнитных сопротивлений ротора по продольной и поперечной магнитным осям (магнитная цепь слабо насыщена) пренебрегаем.

Предполагается, что генератор работает в режиме холостого хода с возбуждением при разомкнутых параллельных ветвях обмотки статора, т.е. поле создается пазовыми токами ротора. В цилиндрической системе координат при сделанных допущениях магнитное поле описывается с помощью уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала Q:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 Q}{\partial J^2} = 0, \quad (2)$$

где r, J – радиальная и угловая координаты.

Расчетная схема включает семь концентрических кольцевых областей: внешняя среда (индекс E): $r^3 R_{SE}$; ярмо статора (индекс S): $R_{SI} \text{ и } R_{SE}$; зубцы статора (индекс ZS): $R_{ZS} \text{ и } R_{SI}$; немагнитный зазор (индекс G): $R_{ZR} \text{ и } R_{ZS}$; зубцы ротора (индекс ZR): $R_{RE} \text{ и } R_{ZR}$; ярмо ротора (индекс R): $R_{RI} \text{ и } R_{RE}$; центральное отверстие ротора (индекс H): $0 \text{ и } R_{RI}$.

Здесь R_{SI} и R_{SE} – внутренний и наружный радиусы ярма статора; R_{RI} и R_{RE} – внутренний и наружный радиусы ярма ротора; R_{ZS} – радиус расточки статора; R_{ZR} – наружный радиус ротора; R_{CR} – радиус окружности, на которой размещаются линейные токи, имитирующие токи пазов ротора $i_{Rk} = \pm n_{\pi} i_f$; $k=1, Z_R$; n_{π} – число витков обмотки в пазу; i_f – ток возбуждения (считается положительным, если направлен «от нас»).

Магнитные проницаемости областей расчетной схемы принимаются равными: $m_E = m_G = m_H = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м; $m_S = k_{\pi S} m_{SFe}$; $m_{ZS} = k_{\pi ZS} m_{ZSFe}$; $m_{ZR} = k_{\pi ZR} m_{ZRFe}$; $m_R = m_{RFe}$. Поправочные коэффициенты $k_{\pi S}$, $k_{\pi ZS}$ и $k_{\pi ZR}$ учитывают уменьшение проницаемостей ярма и зубцов статора, а также зубцов ротора в модели по сравнению с реальной машиной за счет наличия вентиляционных каналов и пазов. Фактические значения проницаемостей m_{SFe} , m_{ZSFe} , m_{ZRFe} , m_{RFe} определяются из расчета магнитной цепи генератора [5] и по значению амплитуды основной гармоники индукции в соответствующем элементе.

Анализ поля ротора удобно проводить в его системе координат, отсчитывая углы от поперечной магнитной оси q (рис. 1). Магнитное поле в произвольной точке с координатами r и J представляет собой результат взаимного наложения элементарных полей, создаваемых линейными токами i_{Rk} . Решая уравнение Лапласа методом разделения переменных, получаем следующие выраже-

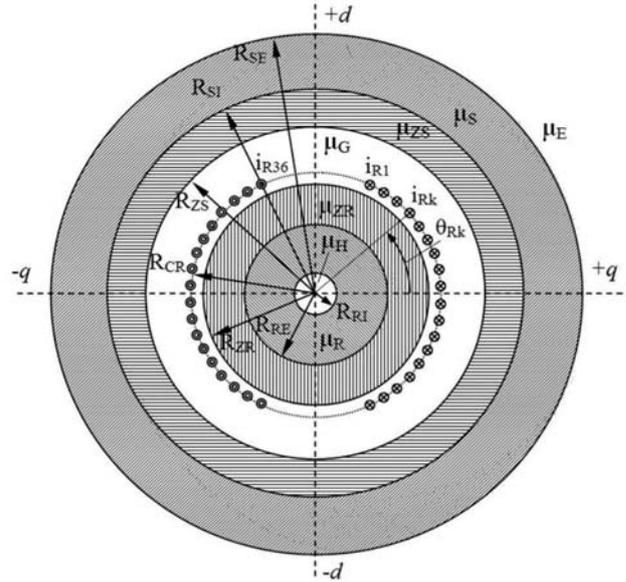


Рис. 1. Расчетная схема магнитного поля турбогенератора

ния для скалярного магнитного потенциала в каждой из областей расчетной схемы:

$$Q_R^E = \sum_{k=1}^{Z_R} \frac{i_{Rk}}{2p} (J - J_{Rk}) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{E_{Rkm}}{r^m} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial J} \sin(m(J - J_{Rk})) \frac{\partial}{\partial r} \quad (3)$$

$$Q_R^S = \sum_{k=1}^{Z_R} \frac{i_{Rk}}{2p} (J - J_{Rk}) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{S_{Rkm}}{r^m} + S_{Rkm} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial J} \sin(m(J - J_{Rk})) \frac{\partial}{\partial r} \quad (4)$$

$$Q_R^{ZS} = \sum_{k=1}^{Z_R} \frac{i_{Rk}}{2p} (J - J_{Rk}) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{ZS_{Rkm}}{r^m} + ZS_{Rkm} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial J} \sin(m(J - J_{Rk})) \frac{\partial}{\partial r} \quad (5)$$

$$Q_R^G = \sum_{k=1}^{Z_R} \frac{i_{Rk}}{2p} a_{Rk} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{G_{Rkm}}{r^m} + G_{Rkm} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial J} \sin(m(J - J_{Rk})) \frac{\partial}{\partial r} \quad (6)$$

$$Q_R^{ZR} = \sum_{k=1}^{Z_R} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{ZR_{Rkm}}{r^m} + ZR_{Rkm} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial J} \sin(m(J - J_{Rk})) \quad (7)$$

$$Q_R^R = \sum_{k=1}^{Z_R} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_{Rkm}}{r^m} + R_{Rkm} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial J} \sin(m(J - J_{Rk}))$$

$$\sin(m(J - J_{Rk})); \quad (8)$$

$$Q_R^H = \sum_{k=1}^{Z_R} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{r^m} H_{Rkm} \sin(m(J - J_{Rk})). \quad (9)$$

В (5), описывающем распределение потенциала в области зазора, угол α_{Rk} с вершиной в точке размещения тока i_{Rk} определяется по выражениям:

при $r > R_{CR}$

$$\alpha_{Rk} = (J - J_{Rk}) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \frac{R_{CR}^m}{r^m} \sin(m(J - J_{Rk})); \quad (10)$$

при $r < R_{CR}$

$$\alpha_{Rk} = \rho - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \frac{r^m}{R_{CR}^m} \sin(m(J - J_{Rk})), \quad (11)$$

где m – порядковый номер пространственной гармоники элементарного поля k -го тока ротора; J_{Rk} – угловая координата k -го тока; Z_R – число обмоточных пазов ротора.

Неизвестные коэффициенты в квадратных скобках (3)–(9) при r^m и $1/r^m$ находятся из условий для радиальных составляющих индукции и тангенциальных составляющих напряженности на каждой из шести границ расчетной схемы:

$$-m_{\text{внут}} \frac{\partial Q_R^{\text{внут}}}{\partial r} = -m_{\text{внеш}} \frac{\partial Q_R^{\text{внеш}}}{\partial r}; \quad (12)$$

$$- \frac{1}{r} \frac{\partial Q_R^{\text{внут}}}{\partial J} = - \frac{1}{r} \frac{\partial Q_R^{\text{внеш}}}{\partial J},$$

где $m_{\text{внут}}$, $Q_R^{\text{внут}}$, $m_{\text{внеш}}$, $Q_R^{\text{внеш}}$ – соответственно, магнитные проницаемости и функции распределения скалярного магнитного потенциала во внутренней и внешней по отношению к границе областях.

Подставляя (3)–(9) в (12) и опуская знаки суммирования, получаем систему из двенадцати уравнений для расчета коэффициентов в уравнениях амплитуды m -й пространственной гармоники потенциала элементарного поля k -го линейного тока.

Наибольший практический интерес представляет исследование магнитного поля в области зазора. На окружности произвольного радиуса r амплитуды радиальной и тангенциальной составляющих n -й пространственной гармоники напряженности результирующего поля системы линейных токов i_{Rk} определяются по формулам:

$$H_{Rn\max r}^G = \sqrt{(H_{Rn\sin r}^G)^2 + (H_{Rn\cos r}^G)^2} =$$

$$= \frac{1}{\rho} \sqrt{\sum_{k=1}^{Z_R} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\partial Q_R^G}{\partial r} \sin(nJ) dJ + \sum_{k=1}^{Z_R} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\partial Q_R^G}{\partial r} \cos(nJ) dJ}; \quad (13)$$

$$H_{Rn\max J}^G = \sqrt{(H_{Rn\sin J}^G)^2 + (H_{Rn\cos J}^G)^2} =$$

$$= \frac{1}{\rho} \sqrt{\sum_{k=1}^{Z_R} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\partial Q_R^G}{\partial J} \sin(nJ) dJ + \sum_{k=1}^{Z_R} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\partial Q_R^G}{\partial J} \cos(nJ) dJ}.$$

(14)

Результаты исследований. Исследование магнитного поля дефектной обмотки ротора проводилось на примере турбогенератора ТВВ-320-2, работающего в режиме холостого хода с током возбуждения, соответствующим номинальному напряжению при исправной обмотке $i_f = i_{f0} = 1165$ А (рассчитан по методике [5]). В выражениях для скалярного потенциала учитываются гармонические составляющие с 1-й по 30-ю включительно ($m = 1, 30$). Проверочный расчет по (3)–(14) показал, что при отсутствии дефектов максимальное значение радиальной составляющей индукции на средней линии зазора составляет 0,868 Тл, что незначительно отличается от приведенного в [7] значения 0,847 Тл для ТВВ-320-2. Таким образом, в целом разработанная математическая модель удовлетворительно описывает магнитное поле рассматриваемого турбогенератора.

Замыкание части витков приводит к определенному искажению первоначальной кривой магнитного поля. Степень искажения зависит от числа замкнутых витков и сопротивления замыкания, а характер – от геометрических данных дефектной катушки. На данном этапе нас интересует главным образом качественная сторона процесса, поэтому для простоты и большей наглядности будем считать, что все $n_{\text{п}}$ витков в пазу замыкаются накоротко и суммарный ток дефектной катушки равен нулю.

На рис. 2 представлены некоторые результаты расчета – графики распределения радиальной и тангенциальной составляющих напряженности на средней линии зазора при замыкании накоротко 1, 5 и 9-й катушек «северного» полюса ротора (силовые линии поля направлены от ротора к статору). Общее число катушек на полюс равно девяти. Катушки имеют различную ширину: $y_{k1} = 0,35t$, $y_{k5} = 0,65t$, $y_{k9} = 0,96t$ (t – полюсное деление). Для сравнения на рис. 2 показаны пунктиром кривые поля исправной обмотки.

Результаты спектрального анализа кривых согласуются с данными [2, 4]: замыкание части витков обмотки возбуждения приводит к появлению в спектре магнитного поля ротора пространственных гармоник четного порядка ($n = 2, 4, 6$ и т.д.). В системе координат ротора амплитуды радиальной и тангенциальной составляющих поля определяются

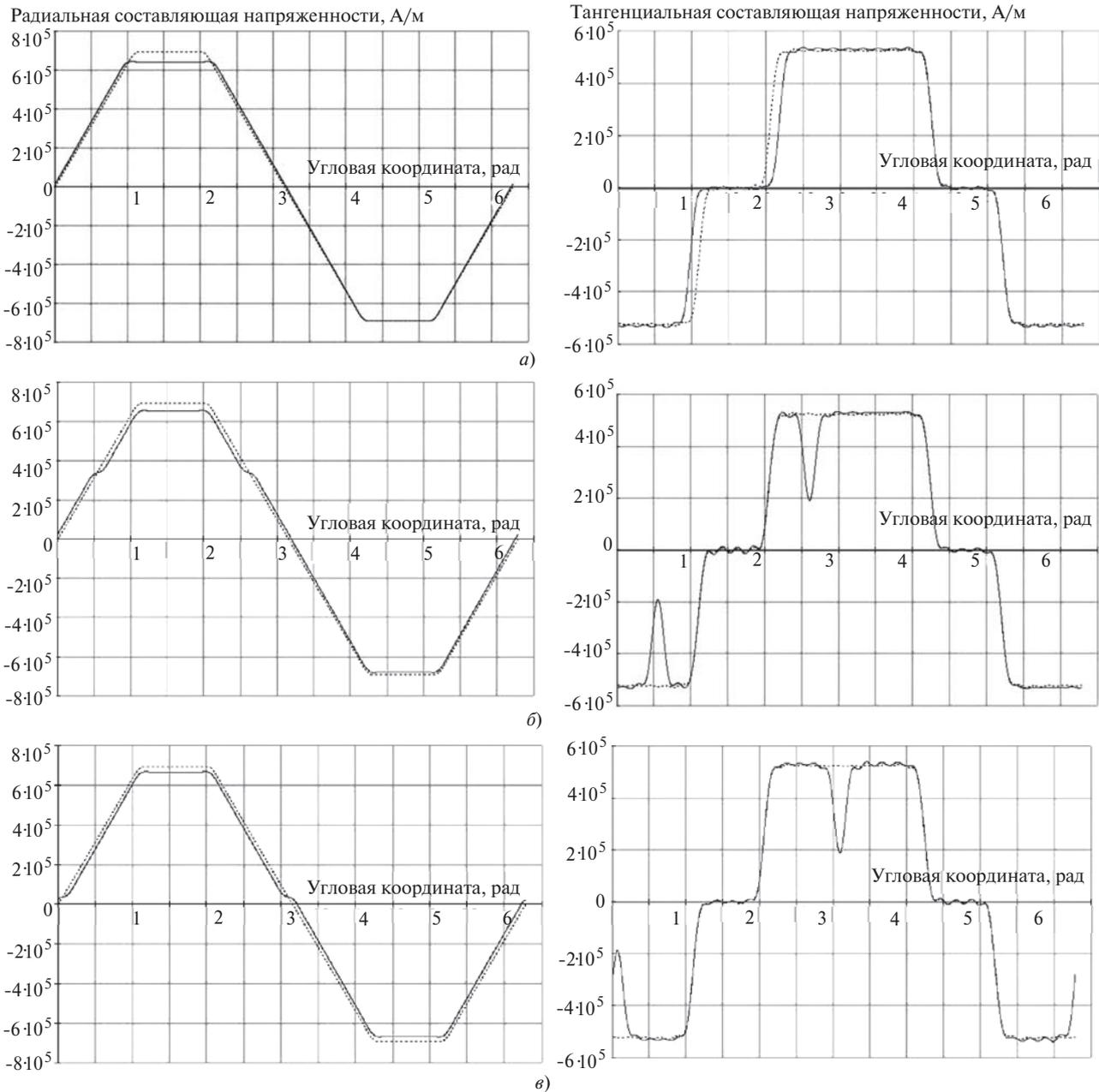


Рис. 2. Радиальные и тангенциальные составляющие поля на средней линии зазора при наличии межвитковых замыканий: а – замкнута катушка № 1; б – замкнута катушка № 5; в – замкнута катушка № 9

только косинусной и синусной составляющими соответственно, т.е. $H_{R\sin r}^G = H_{R\cos r}^G = 0$. При этом, как показывают расчеты, униполярная составляющая в спектре магнитного поля отсутствует.

Все дальнейшие исследования связаны с анализом именно четных гармонических составляющих.

На рис. 3 показаны спектры четных гармоник, построенные по результатам анализа кривых радиальных и тангенциальных составляющих напряженности на средней линии зазора при замыкании катушек «северного» полюса. По оси абсцисс отложены значения частот, с которыми исследуемые гармонические составляющие поля перемагничивают статор. При построении спектров использовались

как положительная, так и отрицательная полуоси ординат, поскольку значения амплитуд отдельных гармоник, рассчитанных по (13) и (14), имеют отрицательный знак. С физической точки зрения это означает, что пространственные кривые данных составляющих смещены относительно начала координат на угол, равный полупериоду соответствующих гармоник. Учет сдвига фазы по изменению знака амплитуды является удобным математическим приемом компактного представления информации.

Расчеты показывают, что при моделировании замыканий в катушках №№ 1–8 знаки амплитуд гармоник указанных составляющих напряженности непостоянны (за исключением 2-й гармоники, ко-

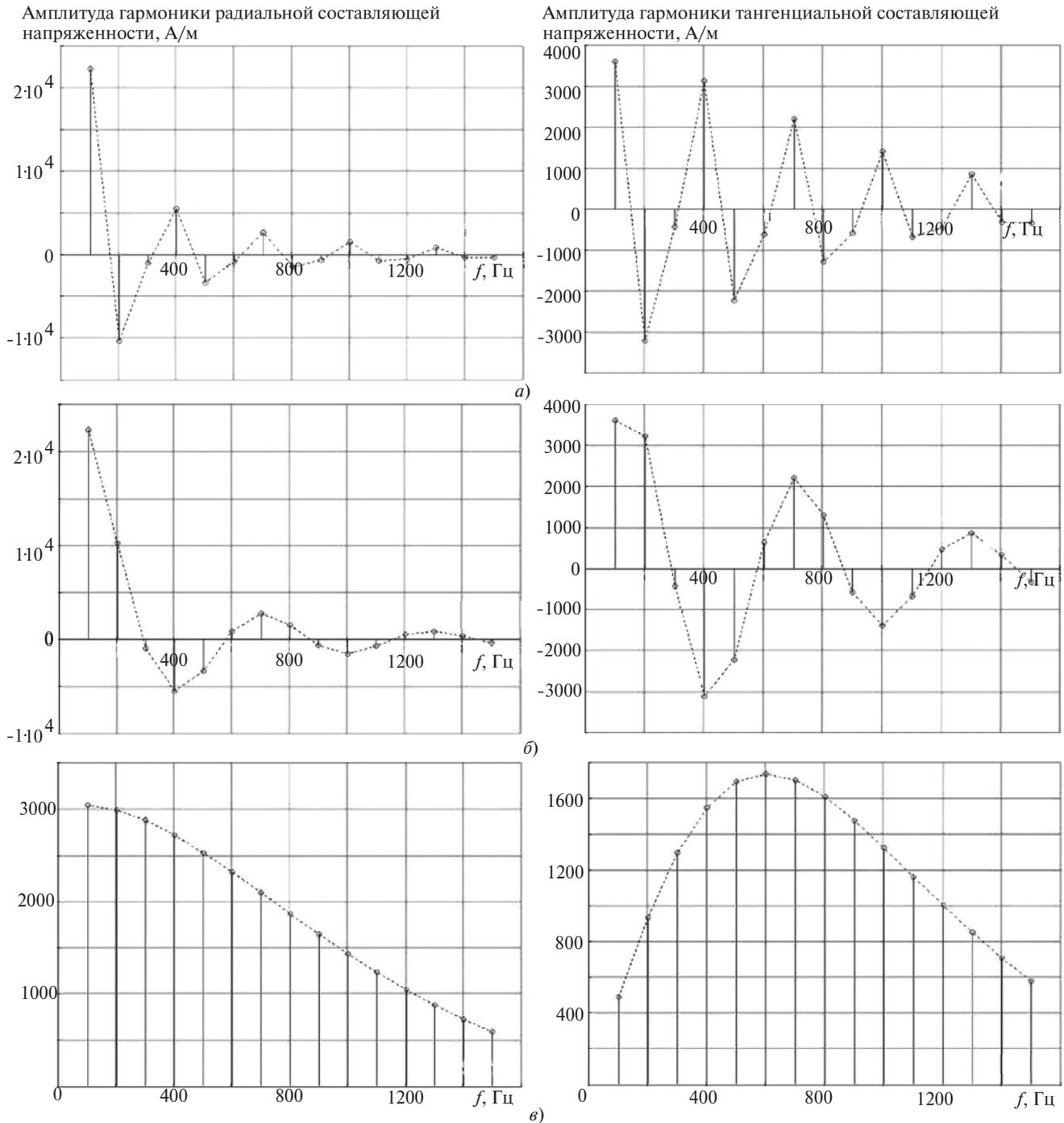


Рис. 3. Спектры радиальных и тангенциальных составляющих поля на средней линии зазора при наличии межвитковых замыканий: а – замкнута катушка № 1; б – замкнута катушка № 5; в – замкнута катушка № 9

торой соответствует частота 100 Гц) и варьируются определенным образом в зависимости от порядка значения n и ширины замыкаемой катушки. Изменение знака происходит через строго определенные частотные интервалы, а огибающие спектров (показаны пунктиром) при этом имеют вид периодических зависимостей. При замыкании катушки № 9 знаки спектральных составляющих в рассматриваемом частотном диапазоне 100, 1500 Гц постоянны и соответствуют знаку амплитуды 2-й гармоники.

В случае повреждения витковой изоляции катушек «южного» полюса (силовые линии направлены от статора к ротору) наблюдается подобная картина. Единственное отличие состоит в том, что знаки спектральных составляющих изменяются на противоположные.

Необходимость учета знака амплитуд (начальных фаз) четных гармоник очевидна. Так, сопоставление спектров радиальной и тангенциальной составляющих напряженности, полученных при замыкании катушек № 1 и 5, показывает, что в обоих

случаях абсолютные значения (модули) амплитуд четных гармоник равны между собой, в результате имеем один и тот же спектр для двух вариантов размещения дефекта. Проблема локализации закороченных витков еще более усложняется, если принять во внимание, что точно такая же форма спектра, составленного из модулей амплитуд четных гармоник, получается при замыкании катушек № 1 и 5 «южного» полюса.

Таким образом, в рассматриваемой ситуации при использовании информации лишь о модулях амплитуд без учета знаков можно наблюдать один и тот же спектр для четырех вариантов размещения дефекта, что исключает возможность однозначного выявления неисправной катушки по спектру магнитного поля.

Отметим важный момент: во всех рассмотренных случаях знаки четных спектральных составляющих поля в зазоре при удалении от поверхности ротора остаются неизменными и не зависят от радиальной координаты.

Введем в рассмотрение новый параметр T_f – период огибающей спектра четных гармоник магнитного поля. Он измеряется в герцах и равен удвоенной ширине частотного интервала, в пределах которого знак четных спектральных составляющих постоянен. Анализ спектров на рис. 3 показывает, что значение T_f зависит от обмоточных данных катушки, в которой произошло замыкание витков: с увеличением ширины «дефектной» катушки $y_{к.д}$ интервал изменения знака четных спектральных компонент также увеличивается, причем зависимость T_f от $y_{к.д}$ не является линейной.

Для уточнения связи между параметрами T_f и $y_{к.д}$ представим МДС дефектной обмотки F_{fd} как результат наложения МДС исправной обмотки F_f и МДС F_d части витков, исключенной вследствие их короткого замыкания и ориентированной встречно F_f :

$$F_{fd} = F_f - F_d. \tag{15}$$

МДС короткозамкнутых витков F_d содержит как нечетные, так и четные гармонические составляющие; амплитуды четных составляющих в соответствии с [6] определяются выражением

$$F_{mнд} = \frac{2i_f n_d}{\pi p} \sin \frac{\pi p \alpha}{2} \left(1 - \frac{y_{к.д}}{t} \frac{\delta}{\delta_0} \right) \tag{16}$$

где i_f – ток ротора; n_d – число короткозамкнутых витков; t – ширина полюсного деления ротора.

Выражение (16) можно рассматривать как уравнение огибающей спектра, образованного из чет-

ных гармонических составляющих МДС, причем n выполняет роль аргумента и представляет собой относительную частоту:

$$n = \frac{f}{f_1} = \frac{f}{50}, \tag{17}$$

где $f_1 = 50$ Гц – частота основной гармоники.

Анализ (16) показывает, что оно обращается в нуль (происходит изменение знака спектральных компонент) при значениях аргумента:

$$n = n_{0j} = 2j \frac{\alpha}{\epsilon} \left(1 - \frac{y_{к.д}}{t} \frac{\delta}{\delta_0} \right)^{-1}, \tag{18}$$

$j = 1, 2, 3, \dots$

Удвоенное значение шага по частоте в спектре между соседними нулевыми значениями амплитуд четных гармоник дает искомое выражение периода огибающей:

$$T_f = 2f_1(n_{0,j+1} - n_{0,j}) = 4j \frac{\alpha}{\epsilon} \left(1 - \frac{y_{к.д}}{t} \frac{\delta}{\delta_0} \right)^{-1} = 20j \frac{\alpha}{\epsilon} \left(1 - \frac{y_{к.д}}{t} \frac{\delta}{\delta_0} \right)^{-1}. \tag{19}$$

На рис. 4. представлена зависимость периода огибающей спектра четных гармоник от относительной ширины замкнутой катушки ротора. Данная кривая справедлива для всех турбогенераторов, у которых отношение числа обмотанных пазов к общему числу пазовых делений ротора составляет 36/52. Сюда относится большая группа турбогене-

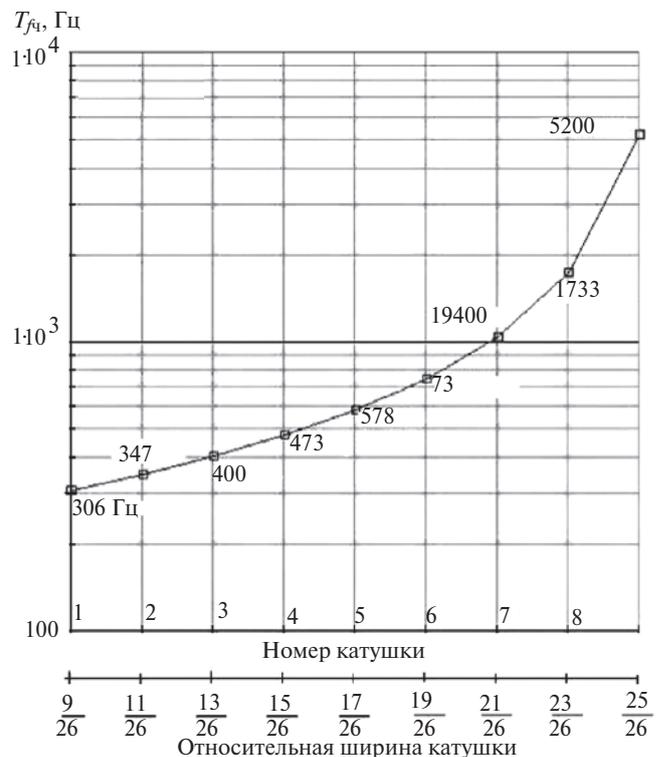


Рис. 4. Зависимость периода огибающей спектра от ширины катушки

раторов, например, ТВВ-200-2, ТВВ-320-2, ТВВ-500-2, ТГВ-200, ТГВ-200М, ТГВ-300, ТВМ-500.

Наличие функциональной связи между периодом огибающей спектра четных гармоник магнитного поля T_f , возникающих при витковых замыканиях, и шириной дефектной катушки $u_{к.д}$, представляет значительный интерес с точки зрения использования этой зависимости в диагностических целях – для обнаружения катушки с неисправной межвитковой изоляцией по результатам спектрального анализа магнитного поля ротора. При этом поскольку знаки амплитуд четных спектральных составляющих остаются постоянными при изменении расстояния от поверхности ротора, то значение параметра T_f не зависит от радиальной координаты установки датчика магнитного поля в зазоре.

Для идентификации полюса с дефектной катушкой целесообразно использовать знак составляющей 100 Гц (2-й гармонической). Как уже было показано выше, он не зависит ни от ширины катушки $u_{к.д}$, ни от порядка гармоники n и определяется лишь принадлежностью короткозамкнутых витков к тому или иному полюсу ротора: «+», если замкнуты витки обмотки на «северном» полюсе, и «-», если – на «южном». С физической точки зрения это выражается в том, что при замыкании витков «северного» полюса магнитный поток 2-й пространственной гармоники ослабляет основной магнитный поток на продольной оси $+d$ «северного» полюса. В случае замыкания витков на «южном» полюсе картина будет противоположной.

Выводы. 1. Спектральный анализ магнитного поля ротора в немагнитном зазоре показывает, что знаки амплитуд четных пространственных гармоник, образующихся при витковых замыканиях, не одинаковы. Изменение знака четных спектральных составляющих с увеличением порядка гармоники n носит периодический характер.

2. При увеличении ширины дефектной катушки $u_{к.д}$ период огибающей спектра четных гармоник T_f также увеличивается. Установлено, что данная связь носит функциональный характер, при этом значение параметра T_f зависит только от относи-

тельной ширины катушки, в которой имеет место замыкание витков. Указанные свойства параметра T_f позволяют рассматривать его в качестве идентификатора катушки с замкнутыми витками в пределах полюса. О принадлежности дефектной катушки тому или иному полюсу ротора можно судить по знаку амплитуды 2-й пространственной гармоники магнитного поля.

3. Использование информации о знаках амплитуд четных гармоник магнитного поля существенно повышает эффективность диагностирования витковой изоляции обмотки возбуждения по спектру магнитного поля на работающем турбогенераторе. Анализ спектра без учета знака амплитуд гармонических составляющих может приводить к ошибкам при локализации дефекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. – М.: НЦ ЭНАС, 2003, 256 с.
2. Цветков В.А. Диагностика мощных генераторов. – М.: НЦ ЭНАС, 1995, 235 с.
3. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Диагностика турбогенераторов. – Л.: Наука, 1989, 119 с.
4. Ройтгарц М.Б. Обнаружение витковых замыканий в роторе работающего турбогенератора на основе спектрального анализа магнитного поля. – Сб. «Электросила», 2004, № 43, с. 190–191.
5. Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В. Проектирование турбогенераторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1987, 256 с.
6. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1987, 400 с.
7. Коган Ф.Л. Аномальные режимы мощных турбогенераторов. – М.: Энергоатомиздат, 1987, 192 с.

[23.09.13]

Автор: Кузнецов Дмитрий Владимирович окончил Институт электротехники Московского энергетического института (технического университета) в 2002 г. по специальности «Электромеханика». В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию «Развитие методов исследования процессов в узлах крепления сердечников статоров к корпусам турбогенераторов и совершенствование методов их диагностики в условиях эксплуатации» в Научно-техническом центре электроэнергетики (ВНИИЭ). Заведующий лабораторией диагностики и повышения надежности стальных конструкций турбогенераторов ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».