

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

А.И. Потапов, В.А. Сясько, М.Ю. Коротеев, П.В. Соломенчук

В статье рассмотрены вопросы применения моделирования и расчета методом конечных элементов параметров экранированных преобразователей вихретокового контроля паяных соединений обмоток статоров турбогенераторов. Обоснован выбор информативного параметра и исследовано влияние мешающих параметров, приведены основные характеристики разработанных преобразователей и результаты их испытаний на реальных изделиях.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, вихретоковый, паяное соединение, турбогенератор

Статорные обмотки турбогенераторов, используемых на ТЭС и АЭС, состоят из медных многожильных стержней, проходящих сквозь турбогенератор вдоль его оси, соединенных друг с другом вилочным паяным соединением в лобовой части турбогенератора. По этим обмоткам протекает весь вырабатываемый турбогенераторами ток. При некачественной пайке соединения обмоток возникают дополнительные потери энергии, может произойти локальный перегрев и возгорание [1].

Конструкция вилочного паяного соединения представлена на рис. 1.

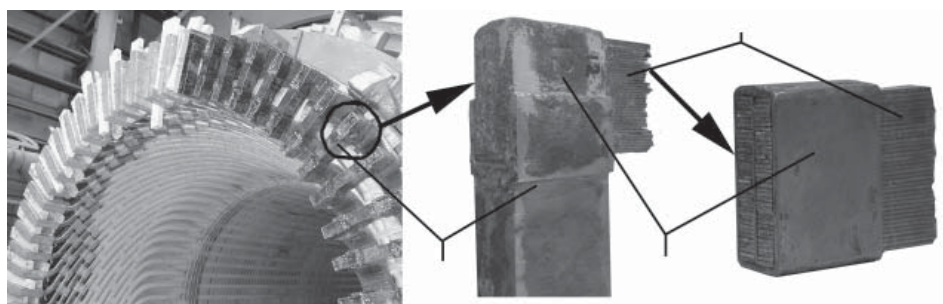


Рис. 1. Конструкция вилочного паяного соединения статорных обмоток турбогенератора. Внешний вид лобовой части турбогенератора (а); спаянные проводники стержня в хомуте в вилке (б); проводники стержня статорной обмотки в хомуте (до запайки) (в):

1 — вилка; 2 — хомут; 3 — проводники стержня статорной обмотки.

Элементарные проводники стержня обмотки, не изолированные возле концов, соединяются друг с другом хомутом и пропаиваются газовой горелкой с применением жидкого флюса и твердого припоя. Затем два спаянных хомута впаиваются в вилку, тем самым замыкая цепь [2].

Объект контроля (ОК) — паяное соединение, может быть полностью пропаянным или с дефектами. В качестве контрольного образца (КО) пол-

Анатолий Иванович Потапов, доктор техн. наук, зав. кафедрой приборостроения Национального минерально-сырьевого университета “Горный” (г. Санкт-Петербург). Тел. (812) 8556085. E-mail: apot@mail.ru

Владимир Александрович Сясько, доктор техн. наук, генеральный директор ЗАО “Константа” (г. Санкт-Петербург). Тел. (812) 3722903, 9334343. E-mail: office@constanta.ru

Михаил Юрьевич Коротеев, аспирант кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета “Горный” (г. Санкт-Петербург). Тел. (812) 3722903. E-mail: office@constanta.ru

Павел Валентинович Соломенчук, канд. техн. наук, начальник сектора приборов электромагнитного контроля ЗАО “Константа”. Тел. (812) 3722903. E-mail: office@constanta.ru

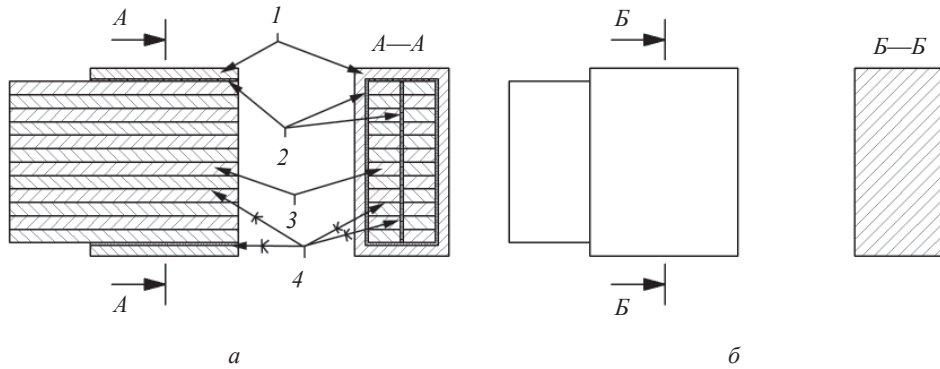


Рис. 2. Контрольные образцы. КО 0 % (а); КО 100 % (б):
1 — хомут; 2 — диэлектрические прокладки; 3 — элементарные проводники; 4 — клеевые соединения.

ностью непропаянного соединения (КО 0 %) используется клеевое соединение аналогичной конструкции, представленной на рис. 2а, с диэлектрическими прокладками, изолирующими элементарные проводники друг от друга. В качестве идеально пропаянного соединения (КО 100 %) используется монолитный медный брусок, размеры и форма внешней поверхности которого идентичны контролируемому соединению, рис. 2б [3].

На рис. 3 представлен эскиз ОК и применяемого для проведения контроля первичного измерительного вихретокового преобразователя (ВТП) экранного типа, обмотки которого имеют с внешних сторон стальные экраны.

На обмотку W_b подается синусоидальное напряжение возбуждения $u_b(t)$ частотой 50 Гц. Выбор частоты обусловлен совпадением с частотой тока, протекающего в штатном режиме работы по статорной обмотке турбогенератора, элементом которой является ОК. Напряжение от обмотки W_i подается на вторичный измерительный преобразователь. Для анализа задачи контроля, а также для проведения моделирования методом конечных элементов КО 100 % имитируется монолитным образцом с удельной электропроводностью $\sigma_m = 58,8$ МСм/м (рис. 4а). Для имитации КО 0 % предложено рассмотреть возможность замены набора изолированных элементарных про-

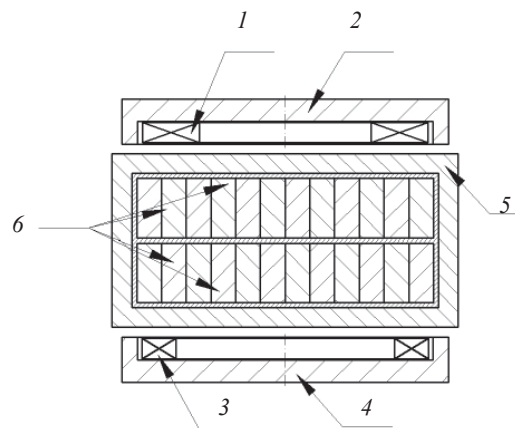


Рис. 3. Положение ОК и ВТП при проведении контроля:
1 — обмотка возбуждения W_b ; 2 — стальной экран обмотки возбуждения; 3 — измерительная обмотка W_i ; 4 — стальной экран измерительной обмотки; 5 — хомут ОК; 6 — элементарные проводники ОК.

водников однородным телом с меньшей удельной электропроводностью σ_d (рис. 4б). Это обусловлено тем, что, несмотря на относительно малые размеры изолированных элементарных проводников, вихревые токи в них наводятся и они оказывают влияние на сигнал ВТП.

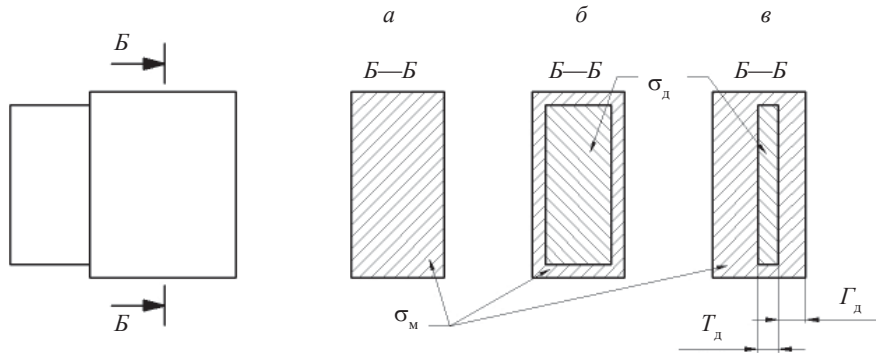


Рис. 4. Модель КО 100 % (а); модель КО 0 % (б); модель ОК (в). T_d — толщина тела, имитирующего дефект, Γ_d — глубина залегания тела, имитирующего дефект.

Поскольку дефектом пайки ОК являются неспаившие друг с другом элементарные проводники, то для его имитации, аналогично как и для имитации набора изолированных проводников КО 0 %, занимаемую им область в модели предлагается заменить однородным телом с меньшей удельной электропроводностью σ_d (рис. 4в). На этом же рисунке показаны геометрические переменные, используемые в модели, описывающие размеры тела, имитирующего дефект.

Предлагаемая конечно-элементная модель ВТП и ОК построена в соответствии с [5]. Графическое изображение конечно-элементной модели представлено на рис. 5.

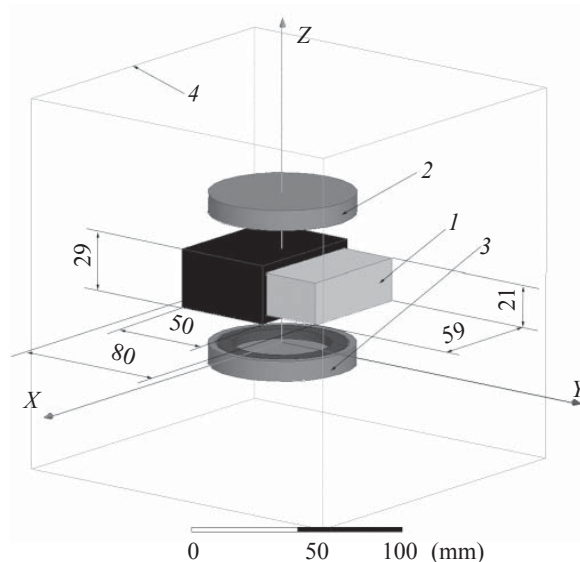


Рис. 5. Конечно-элементная модель ВТП и ОК, расположенного между его обмотками: 1 — ОК; 2 — измерительная обмотка ВТП с экраном; 3 — обмотка возбуждения с экраном; 4 — область пространства расчета поля модели.

Электромагнитные параметры материалов модели

№	Наименование	Удельная электропроводность, σ	Относительная магнитная проницаемость, μ
1	Хомут ОК	58,8 МСм/м	1
2	Однородное тело, заменяющее набор изолированных элементарных проводников в области дефекта	Переменная	1
3	Стальные экраны обмоток ВТП	2 МСм/м	100
4	Обмотка возбуждения ВТП	58,8 МСм/м	1
5	Обмотка измерительная ВТП	2 См/м	1

Электромагнитные параметры материалов модели приведены в таблице.

По границе области пространства расчета модели напряженность магнитного поля модели приравнивается к нулю, размеры области превышают габаритные размеры модели на 50 мм (с тыльной стороны ВТП напряженность магнитного поля пренебрежимо мала).

Обмотка возбуждения имитируется медным кольцом, без учета влияния вихревых токов на распределение плотности тока возбуждения в сечении медного кольца.

Измерительная обмотка реального ВТП подключается через пассивный фильтр к входу операционного усилителя с высоким входным сопротивлением. Для ее имитации в конечно-элементной модели применяется кольцо из материала, электропроводность которого минимально возможная для электропроводящего тела, применяемого в данной среде моделирования, $\sigma_{\text{и}} = 2 \text{ См/м}$. При среднем диаметре обмотки $D_{\text{и}} = 50 \text{ мм}$ и площади сечения обмотки $S_{\text{и}} = 27 \text{ мм}^2$ сопротивление составит $R_{\text{и}} = D_{\text{и}} / (S_{\text{и}} \sigma_{\text{и}}) = 2,9 \text{ кОм}$.

Ток возбуждения модели ВТП задается в сечении обмотки возбуждения, выходной сигнал моделируется током, протекающим через сечение измерительной обмотки (рис. 6).

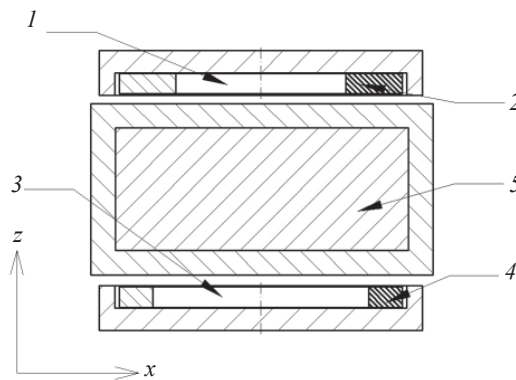


Рис. 6. Ток модели обмоток возбуждения и измерительной.

1 — обмотка возбуждения; 2 — сечение обмотки возбуждения, в котором задан ток возбуждения; 3 — измерительная обмотка; 4 — сечение измерительной обмотки, в котором измеряется ток измерительной обмотки; 5 — ОК.

Выходным сигналом модели является ток измерительной обмотки, протекающий через ее сечение. Вычисление комплексных составляющих тока измерительной обмотки $I_{и}$ производится по формулам (1, 2) [6]:

$$\operatorname{Re}(I_{и}) = \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \operatorname{Re}(J_x) dydz; \quad (1)$$

$$\operatorname{Im}(I_{и}) = \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \operatorname{Im}(J_x) dydz, \quad (2)$$

где J_x — составляющая плотности тока в сечении измерительной обмотки, параллельная оси x .

Эквивалентная удельная электропроводность тела, имитирующего дефект КО 0 %, определена по следующей методике. Изготовлен реальный ВТП, описанный в конечно-элементной модели, а также ряд монокристаллических образцов. Материал монокристаллических образцов: медь М1Е $\sigma_{\text{М1Е}} = 58,6$ МСм/м, алюминиевый сплав АК6 $\sigma_{\text{ал}} = 26,5$ МСм/м, латунь ЛМЦ $\sigma_{\text{лат}} = 9,79$ МСм/м. Измерено комплексное напряжение измерительной обмотки реального ВТП, в магнитное поле которого поочередно установлены монокристаллические образцы и КО 0 %. Аналогичный эксперимент проведен в среде моделирования, при этом удельная электропроводность однородного тела, имитирующего дефект, выбрана в виде переменной в диапазоне от 0,1 до 58 МСм/м.

Поскольку выходным сигналом модели ВТП является ток в сечении измерительной обмотки, а выходным сигналом реального ВТП — напряжение измерительной обмотки, их непосредственное сравнение некорректно. Для сравнения результатов моделирования с результатами испытаний реального ВТП вычисляется падение напряжения на кольце, моделирующем измерительную обмотку. Полученное напряжение, как и напряжение реального ВТП, нормировано по сигналу с ВТП без внесенных в его магнитное поле электропроводящих объектов (“на воздухе”) [7]

$$\dot{U}^* = \frac{\dot{U}_{и}}{\dot{U}_{и(\text{возд})}}, \quad (3)$$

где $\dot{U}_{и}$ — падение напряжения на кольце, моделирующем измерительную обмотку (для модели ВТП) или напряжение на измерительной обмотке ВТП (для реального ВТП); $\dot{U}_{и(\text{возд})}$ — $\dot{U}_{и}$ без внесенных в его магнитное поле электропроводящих объектов (“на воздухе”).

Годографы нормированных сигналов реального ВТП и рассчитанных сигналов модели ВТП представлены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что сигнал реального ВТП с КО 0 % (точка 4) наиболее близок к сигналу реального ВТП с латунным монокристаллическим образцом $\sigma_{\text{лат}} = 9,79$ МСм/м (точка 9). Амплитуда сигнала реального ВТП с КО 0 % составляет 83 % амплитуды сигнала реального ВТП с латунным монокристаллическим образцом. Аналогичное соотношение амплитуд наблюдается в модели в случае, если удельная электропроводность тела, имитирующего дефект, соответствует 3 МСм/м. Это значение применяется для дальнейшего моделирования тела, имитирующего дефект КО 0 % и ОК.

Исследовано влияние удельной электропроводности монокристаллического образца, а также размеров и расположения тела, имитирующего дефект в объеме ОК, на сигнал модели ВТП (рис. 8).

Из рис. 8 видно, что размер тела, имитирующего дефект ОК, оказывает влияние на амплитуду и фазу сигнала модели ВТП, а глубина расположения тела, имитирующего дефект ОК, — преимущественно на фазу сигнала

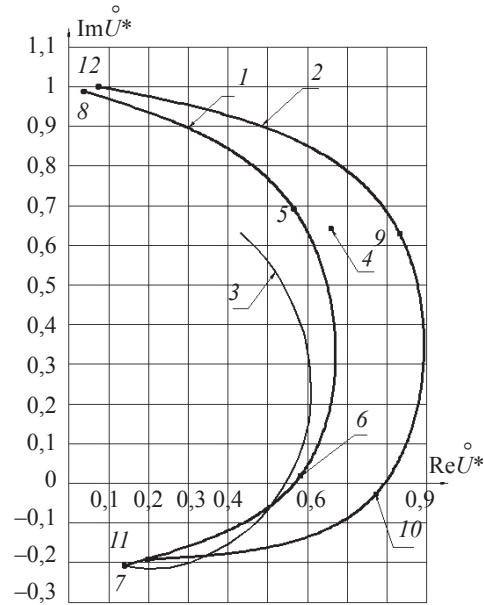


Рис. 7. Годографы нормированных сигналов модели и реального ВТП:
 1 — годограф нормированного сигнала модели ВТП, соответствующий изменению удельной электропроводности монолитного образца (5, 6, 7 — точки на годографе 1, соответствующие удельной электропроводности монолитного образца: 9,79; 26,5 и 58,6 МСм/м соответственно, 8 — точка на годографе 1, соответствующая «воздуху»); 2 — годограф нормированного сигнала реального ВТП, соответствующий изменению удельной электропроводности монолитного образца (9, 10, 11 — точки на годографе 2, соответствующие удельной электропроводности монолитного образца: 9,79; 26,5 и 58,6 МСм/м соответственно, 12 — точка на годографе 2, соответствующая «воздуху»); 3 — годограф нормированного сигнала модели ВТП, соответствующий изменению удельной электропроводности тела, имитирующего дефект КО 0%; 4 — точка, соответствующая сигналу реального ВТП с КО 0%.

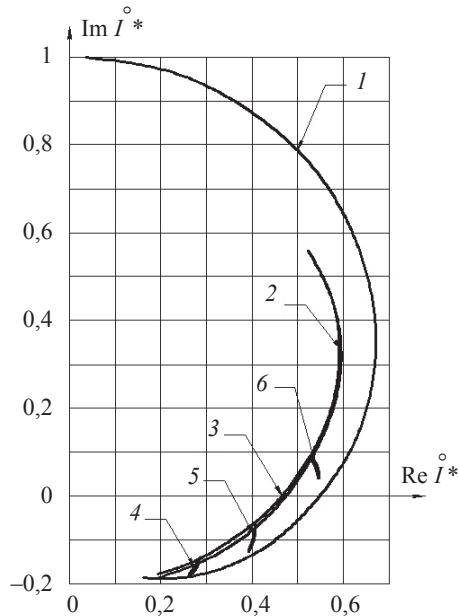


Рис. 8. Годографы влияния толщины и глубины залегания тела, имитирующего дефект:
 1 — годограф нормированного сигнала модели ВТП, соответствующий изменению удельной электропроводности ОК в диапазоне от 1 до 59 МСм/м; 2, 3 — годографы нормированного сигнала модели ВТП, соответствующие изменению толщины тела, имитирующего дефект ОК, в диапазоне от 1 до 21 мм, расположенного возле обмотки возбуждения и измерительной обмотки, соответственно; 4, 5, 6 — годографы нормированного сигнала модели ВТП, соответствующие изменению глубины расположения тела, имитирующего дефект ОК фиксированной толщины: 5, 10 и 15 мм соответственно.

модели ВТП, влияние на амплитуду незначительно и немонотонно. Сигналы модели ВТП при расположении тела, имитирующего дефект ОК, как возле измерительной, так и возле обмотки возбуждения, практически совпадают.

При проведении контроля помимо контролируемого параметра (степени пропаянности или толщины тела, имитирующего дефект) на сигналы ВТП также оказывают влияние мешающие параметры, которые можно условно разделить на группы [8]:

- геометрические, связанные с взаимным расположением ВТП и ОК;
- геометрические, определяемые формой и размерами ОК;
- электромагнитные, характеризующиеся свойствами ОК.

Годографы нормированных сигналов модели ВТП, показывающие влияние геометрических мешающих параметров взаимного расположения ВТП и ОК, представлены на рис. 9.

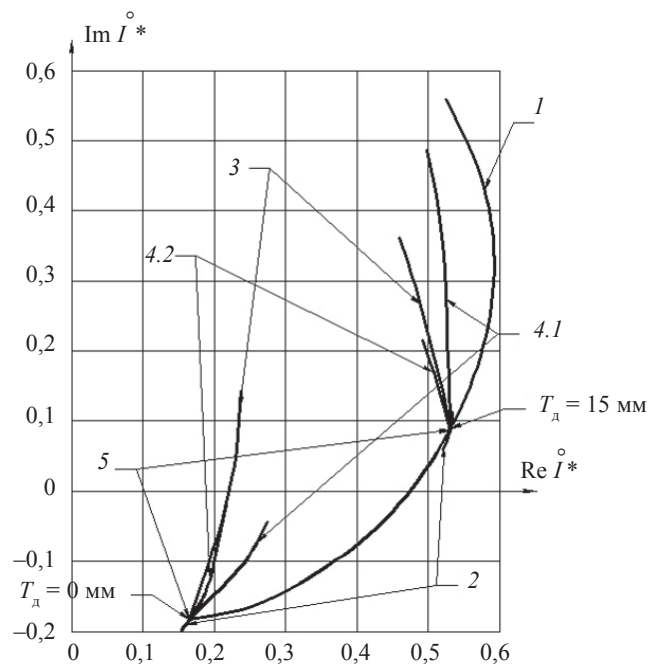


Рис. 9. Годографы влияния геометрических мешающих параметров взаимного расположения модели ВТП и КО:

1 — годограф нормированного сигнала модели ВТП, соответствующий изменению толщины тела, имитирующего дефект ОК, в диапазоне от 1 до 21 мм, расположенного возле обмотки возбуждения модели ВТП (приведен для наглядного сравнения степени влияния контролируемого и мешающих параметров); 2 — годографы нормированного сигнала модели ВТП, соответствующие смещению модели ВТП относительно ОК вдоль оси модели ВТП в диапазоне от 0 до 11 мм; 3 — годографы нормированного сигнала модели ВТП, соответствующие смещению модели ВТП вдоль оси x ОК, в диапазоне от 0 до 15 мм; 4.1 и 4.2 — годографы нормированного сигнала модели ВТП, соответствующие смещению модели ВТП вдоль оси y ОК: 4.1 — в диапазоне от 0 до 15 мм, 4.2 — от -15 до 0 мм (см. рис. 5); 5 — годографы нормированного сигнала модели ВТП, соответствующие повороту модели ВТП вокруг осей x и y ОК в диапазоне от 0 до 9° .

Влияние мешающих параметров показано при толщине тела, имитирующего дефект ОК: 0 и 15 мм.

На рис. 9 годографы 5 обозначены точками, так как их длина столь мала, что они не могут быть отображены точнее в выбранном масштабе. Мешающие параметры взаимного расположения модели ВТП и ОК оказывают влияние преимущественно на фазу сигнала модели ВТП.

Годографы нормированных сигналов модели ВТП, показывающие влияние геометрических мешающих параметров ОК, а также влияние изменения расстояния между обмотками модели ВТП, представлены на рис. 10.

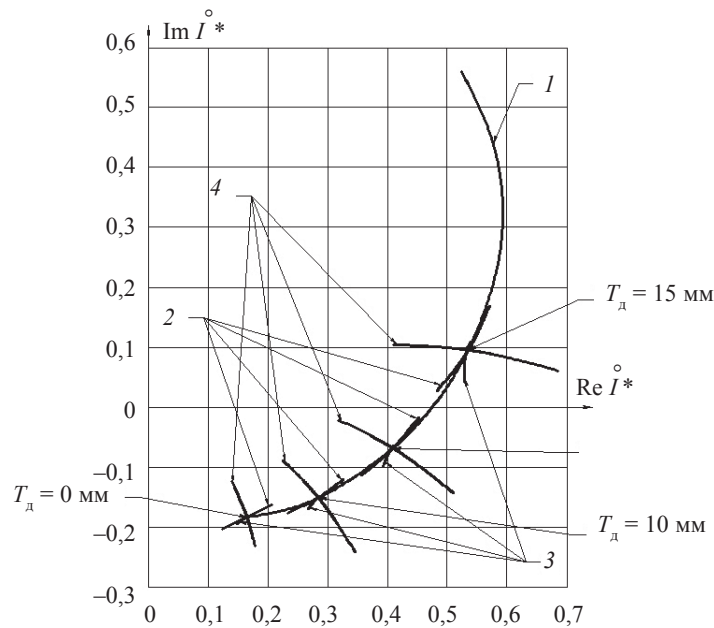


Рис. 10. Годографы влияния геометрических мешающих параметров ОК и расстояния между обмотками модели ВТП:

1 — годограф нормированного сигнала модели ВТП, соответствующий изменению толщины тела, имитирующего дефект ОК, в диапазоне от 1 до 21 мм, расположенного возле обмотки возбуждения (приведен для наглядного сравнения степени влияния контролируемого и мешающих параметров); *2* — годографы нормированного сигнала модели ВТП, соответствующие вариации толщины медного хомута ОК, в диапазоне от 2 до 4 мм; *3* — годографы нормированного сигнала модели ВТП, соответствующие вариации ширины элементарных проводников, в диапазоне от 20 до 22 мм; *4* — годографы нормированного сигнала модели ВТП, соответствующие изменению расстояния между обмотками модели ВТП, в диапазоне от 33 до 40 мм.

Влияние мешающих параметров показано при толщине тела, имитирующего дефект ОК: 0, 5, 10 и 15 мм.

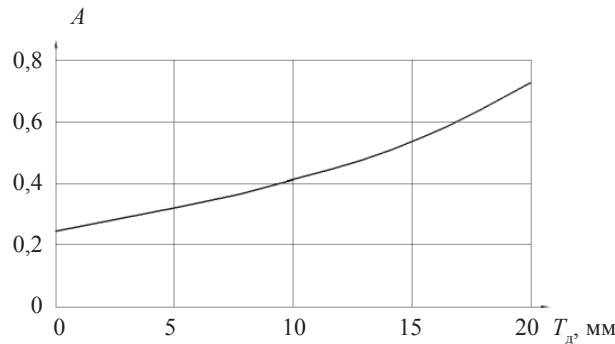


Рис. 11. Зависимость рассчитанной амплитуды нормированного сигнала модели ВТП от толщины тела, имитирующего дефект ОК.

Анализируя годографы на рис. 10, мы видим, что рассматриваемые мешающие параметры оказывают влияние как на фазу, так и амплитуду сигнала модели ВТП.

Обобщая данные, представленные на рис. 9—11, можно сделать следующие выводы:

мешающие параметры взаимного расположения ВТП и ОК на практике встречаются чаще всего. Они оказывают значительное влияние на фазу

сигнала модели ВТП, однако их влияние на амплитуду сигнала модели ВТП мало. Это говорит о том, что для уменьшения их влияния следует использовать в качестве информативного параметра амплитуду сигнала ВТП.

Зависимость рассчитанной амплитуды нормированного сигнала модели ВТП от толщины тела, имитирующего дефект ОК, показана на рис. 11, из которого видно, что эта характеристика монотонная и ее кривизна изменяется незначительно во всем диапазоне изменения толщины тела, имитирующего дефект ОК.

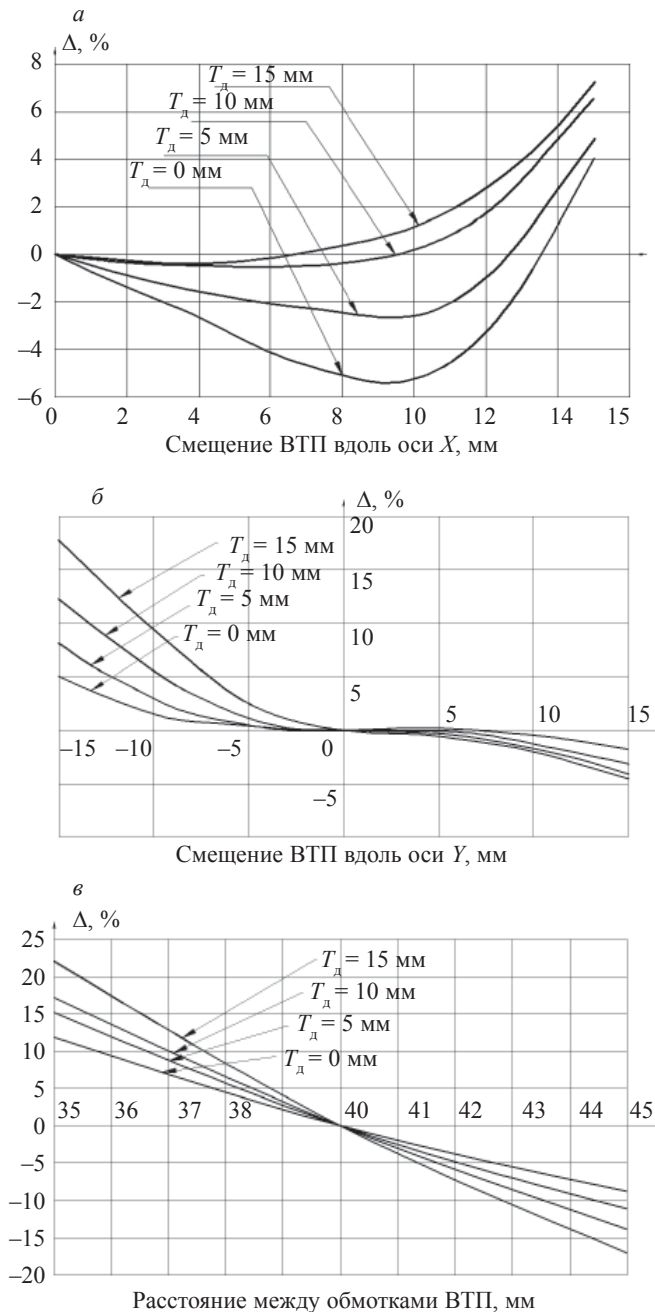


Рис. 12. Графики зависимости абсолютной дополнительной погрешности измерения от мешающих параметров при различном значении толщины T_d тела, имитирующего дефект: а — смещения ВТП вдоль оси x ОК; б — смещения ВТП вдоль оси y ОК; в — расстояния между обмотками ВТП.

Дополнительная погрешность измерения возникает вследствие отклонения мешающих параметров от их нормального значения. Зависимость абсолютной дополнительной погрешности измерения от мешающих параметров приведена на рис. 12.

Анализ влияния мешающих параметров (рис. 8—12), а также результаты испытаний разработанного ВТП с оснастками для позиционирования, позволяют говорить о гарантируемой допускаемой погрешности измерения степени пропаянности $\Delta \leq \pm 5\%$.

В [1] нормируется минимальное допустимое значение степени пропаянности (70 %). Исходя из достигаемого значения $\Delta \leq \pm 5\%$, при контроле следует устанавливать браковочный уровень (75 %) для исключения недобраковки.

ВЫВОДЫ

Предложенная модель ВТП экранного типа и объекта контроля с дефектами, имитирующими реальные, позволяет рассчитать чувствительность, а также оценить влияние основных мешающих параметров и погрешность измерения при контроле паяных соединений обмоток турбогенераторов.

На основании результатов моделирования разработан прибор, первичные измерительные преобразователи и предложена методика контроля с их использованием.

ЗАО “Константа”
Национальный минерально-сырьевой
университет “Горный”
Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
16 января 2014 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Под общей редакцией Алексеева Б.А., Когана Ф.Л., Мамиконянца Л.Г. Изд. 7.— М.: НЦ ЭНАС, 2002.
2. Вольдек А.И. Электрические машины.— Л.: Энергия, 1978.
3. Сясько В.А., Ройтгарц М.Б., Коротеев М.Ю., Смоломенчук П.В. Контроль качества паяных соединений стержней статорных обмоток турбогенераторов на заводе “Электросила”.— В мире неразрушающего контроля, июнь 2010, № 2 (48), с. 40—43.
4. Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. Научное, методическое, справочное пособие.— СПб.: Гуманистика, 2009.— 904 с.
5. Ansoft Maxwell 3D Field Simulator v11 User’s Guide.— USA Pittsburg PA: Suite 200, Ansoft corporation, 2006.— 675 с.
6. Ana Alonso Rodrigues, Alberto Valli. Eddy current approximation of Maxwell equation. Theory, algorithm and application.— Italia Verlag: Springer, 2010.— 361 с.
7. Неразрушающий контроль. Справочник. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2, кн 2. Вихре-токовый контроль. Изд. 2, испр.— М.: Машиностроение, 2006.— 688 с.
8. Потапов А.И., Сясько В.А., Ивкин А.Е., Сясько А.В. К вопросу о калибровке вихре-токовых фазовых преобразователей на примере толщиномеров цинковых покрытий.— Дефектоскопия, № 9, 2013, с. 17—22.