

УДК 534.1:621.3

**Г.А. Елгина, С.М. Слободян**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАМЫКАНИЙ  
ВИТКОВ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ  
КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ**

В статье методом физического моделирования проведена оценка поперечных механических деформаций проводов обмотки трансформатора, вызванных фактором короткого замыкания витков.

**Ключевые слова:** физическая модель; тепловая деформация; замыкание.

**G.A. Elgina, S.M. Slobodyan**

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

**PHYSICAL MODELING OF THE FAULT INFLUENCE  
ON ELECTRODYNAMIC STABILITY OF INDUCTORS**

In this article the evaluation of transverse deformation of the transformer wires caused by short circuit of turns is performed.

**Keywords:** physical model; thermal deformation; closing.

Трансформаторные элементы (обмотки индуктивности, соленоиды, дроссели, фильтры и т.д.) во многих промышленных механизмах, машинах и оборудовании находят широкое применение, в том числе в высокоточных и высокочувствительных средствах контроля деформации волнового фронта волн оптического излучения и пространственно ограниченных лазерных и электромагнитных пучков, оптических и лазерных гетеродинных системах и устройствах, системах контроля скорости, определения безопасного расстояния при движении в потоке транспорта и во многих других устройствах [1–7].

Обзор большого числа работ по мониторингу состояния трансформаторов показал, что возможности использования для этой цели параметров схемы замещения, определяемых в рабочем режиме, используются незаслуженно мало. Метод определения параметров схемы

замещения трансформатора в рабочем режиме используется только для трехобмоточного трансформатора. Ряд источников информации указывает на взаимосвязь между внутренними повреждениями и параметрами схемы замещения трансформатора, что приводит к необходимости осуществления процедур контроля состояния активных частей трансформаторов по этим параметрам, однако конкретные структурные алгоритмы организации непрерывного контроля параметров схемы замещения в литературе не описаны.

В последнее время проблема контроля и диагностики состояния индуктивных элементов и структур (трансформаторных, соленоидных и т.п.) в связи с их широким распространением в электронной, радио- и электротехнических и многих других отраслях мировой экономики приобрела высокую актуальность. Электрическое старение материала межвитковой изоляции сопутствует появлению тенденции необратимых изменений свойств изоляции и самого индуктивного элемента. Ухудшение свойств материала изоляции межвиткового промежутка с течением времени эксплуатации индуктивной структуры приводит к возникновению нарушений топологии индуктивности и проявлению эффектов коротких замыканий витков, смежных в пространстве геометрии их расположения в объеме индуктивной структуры, например трансформатора. Появление короткого замыкания сопровождается потерями энергии, проявляющимися выделением тепловой энергии и в конечном счете к механическим деформациям структуры, приводящим к потере устойчивости топологии (электродинамической стойкости) и к механическим повреждениям изоляции проводников и материала слоя межвиткового промежутка. Это осевые и радиальные остаточные деформации, скручивание и раскручивание обмоток.

Указанные обстоятельства определяют цель и задачи изложенного ниже анализа и приводят к необходимости изучения особенностей нарушения температурного состояния обмоток индуктивности узла при замыкании смежных витков исходно однородной индуктивной структуры, например [1–3], катушек фокусирующей и отклоняющей электронный пучок приемного устройства системы преобразования оптического изображения в фотоэлектронное, с целью определения изменившейся взаимосвязи параметров фокусирующей и отклоняющей системы и закономерностей их изменения в измененной замыканием витков индуктивной структуре с исходной однородной начальной топологией.

В работе для оценки деформаций обмотки трансформатора при токах короткого замыкания проведен расчет поперечной деформации обмоток с использованием математического пакета COMSOL Multiphysics. При токах короткого замыкания теряется электродинамическая стойкость – происходят механические повреждения. Это осевые и радиальные остаточные деформации, скручивание и раскручивание обмоток силового трансформатора. Приведем методику расчета поперечной деформации провода обмоток трансформатора при токе короткого замыкания с использованием математического пакета COMSOL Multiphysics.

Для получения расчетной оценки было использовано известное [8] аналитическое выражение для тензора поверхностного натяжения с первоначальным предварительным определением векторного магнитного потенциала, а затем, на втором этапе проведения расчетов, величины распределения электрической магнитной напряженности поля, вызванного током проводников:

$$\nabla \times (\mu \mathbf{H}) = \mathbf{J}, \quad \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A},$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $\mathbf{H}$  – вектор магнитной напряженности поля, определяемый током, протекающим по проводнику;  $\mathbf{J}$  – вектор распределения плотности тока по сечению проводника,  $\mathbf{J} = (J_x, J_y, J_z)^T$ ;  $\mathbf{A}$  – векторный магнитный потенциал,  $\mathbf{A} = (A_x, A_y, A_z)^T$ .

При определении тензора Максвелла использовалось известное соотношение:

$$\sigma_{jk} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \left( H_i H_k - \frac{H^2 \delta_{jk}}{2} \right) \rightarrow \frac{\varepsilon}{4\pi} \begin{pmatrix} H_x^2 - \frac{H^2}{2} & H_x H_y & H_x H_z \\ H_y H_x & H_y^2 - \frac{H^2}{2} & H_y H_z \\ H_z H_x & H_z H_y & H_z^2 - \frac{H^2}{2} \end{pmatrix}$$

где  $\sigma$  – тензор механических напряжений,  $\sigma = \sigma_{jk}$ ;  $j, k$  – элементы тензора механических напряжений;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $H_i, i = 1, 2, 3$  компонента напряженности магнитного поля;  $\delta_{jk}$  –

символ Кронекера,  $\delta_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{если } j=k \\ 0, & \text{если } j \neq k \end{cases}$ .

Интегрирование последнего соотношения по поверхности проводников дает распределение натяжений поверхности, соответствующее выбранной геометрической форме сечения проводников в обмотке индуктивного элемента.

В качестве примера исследуемой индуктивной структуры были составлены математические модели внешней и внутренней обмоток индуктивности силового трансформатора электрического питания.

Внешняя обмотка индуктивной структуры выполнена медным проводом круглого сечения диаметром  $d = 2$  мм, с количеством витков  $n = 120$ , внутренним диаметром  $d_{\text{вн}} = 140$  мм и внешним диаметром  $D_{\text{внеш}} = 160$  мм. Длина медного кабеля  $l = 370$  мм, основа – полихлорвиниловый цилиндр.

Внутренняя обмотка намотана медной шиной размерами:  $a = 4$  мм,  $b = 7$  мм с количеством витков внутренней обмотки  $n = 20$ , внутренним диаметром  $d_{\text{вн}} = 86$  мм и внешним диаметром  $D_{\text{внеш}} = 102$  мм. Длина медного кабеля  $l = 370$  мм, основа – винипластовый цилиндр.

Визуализация результатов расчета поперечной деформации провода обмоток трансформатора при токе короткого замыкания была выполнена в виде эпюр распределений поверхностных сил для внешней и внутренней обмоток индуктивности трансформатора соответственно.

### **Библиографический список**

1. Slobodyan S.M., Galakhov V.N., Sazanovich V.M. Dissector Follower System for Angular Fluctuation Measurement of an Optical Beam // Instruments and experimental techniques. – New York, 1980. – № 4. – P. 123–125.
2. Слободян С.М. Диссекторные гетеродинные системы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1986. – № 6. – С. 62–72.
3. Слободян С.М. Следящий оптический фазометр // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 101–106.
4. Slobodyan S.M. Multidimensional coordinate actuator of microcontrol // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 92–95.
5. Елгина Г.А., Ивойлов Е.В., Слободян С.М. Влияние замыканий на свойства индуктивности // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 5. – С. 21–26.

6. Елгина Г.А., Ивойлов Е.В., Слободян С.М. Преобразование свойств соленоида электрического копра при замыкании витков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 5. – С. 175–184.

7. Елгина Г.А., Слободян С.М. Преобразование свойств индукционной катапульты замыканием витков катушки // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 3. – С. 170–175.

8. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 487 с.

### References

1. Slobodian S.M., Galakhov V.N., Sazanovich V.M. Dissector Follower System for Angular Fluctuation Measurement of an Optical Beam. *Instruments and experimental techniques*. New York, 1980, no. 4, pp. 123-125.

2. Slobodian S.M. Dissektornye geterodinnye sistemy [Dissektorny heterodyne systems]. *Zarubezhnaia radioelektronika*, 1986, no. 6, pp. 62-72.

3. Slobodian S.M. Slediashchii opticheskii fazometr [Follow-up optical phase meter]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2003, vol. 306, no. 6, pp. 101-106.

4. Slobodian S.M. Multidimensional coordinate actuator of microcontrol. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 5, pp. 92-95.

5. Elgina G.A., Ivoilov E.V., Slobodian S.M. Vliianie zamykanii na svoistva induktivnosti [Influence of closings on properties of inductivity]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2014, no. 5, pp. 21-26.

6. Elgina G.A., Ivoilov E.V., Slobodian S.M. Preobrazovanie svoistv solenoida elektricheskogo kopra pri zamykanii vitkov [Conversion of properties of the solenoid electrical a copra when closing rounds]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2014, no. 5, pp. 175-184.

7. Elgina G.A., Slobodian S.M. Preobrazovanie svoistv induktsionnoi katapult'y zamykaniem vitkov katushki [Conversion of properties of an induction catapult closing of rounds of the coil]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2014, no. 3, pp. 170-175.

8. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. Raschet induktivnostei: spravochnaia kniga [Calculation of inductance: reference book]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 487 P.

### **Сведения об авторах**

**Елгина Галина Александровна** (Томск, Россия) – аспирантка Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: galinaelgina@mail.ru).

**Слободян Степан Михайлович** (Томск, Россия) – доктор технических наук, профессор Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: sms\_46@ngs.ru).

### **About the authors**

**Elgina Galina Aleksandrovna** (Tomsk, Russian Federation) – graduate student National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Lenina ave., 30, e-mail: galinaelgina@mail.ru).

**Slobodyan Stepan Mikhailovich** (Tomsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Lenina ave., 30, e-mail: sms\_46@ngs.ru).

Получено 20.02.2015