

УДК 621.314.21

РАСЧЕТ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ИННОВАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Л.М. Инаходова, А.Ю. Андреев, А.А. Казанцев

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: kazantzev@63.ru

Рассмотрены новые, более совершенные и эффективные по сравнению с существующими, конструкции силовых трансформаторов для применения в распределительных электрических сетях и системах электроснабжения России. Выполнен расчет некоторых аварийных режимов в электрических сетях на напряжение 10 и 20 кВ с использованием новых конструкций трансформаторов на схеме существующей электрической сети. Выполнен сравнительный анализ расчетных сопротивлений трансформаторов различной конструкции и токов короткого замыкания на шинах высокого и низкого напряжения. Констатируется необходимость решения проблем увеличения токов короткого замыкания при применении современных энергоэффективных конструкций силовых трансформаторов.

Ключевые слова: трансформатор, энергосбережение, короткое замыкание, потери, энергоэффективность, аморфные магнитные материалы, высокотемпературные сверхпроводниковые материалы.

Использование в современных электрических сетях и системах электроснабжения (ЭССЭ) устаревших конструкций трансформаторной техники не отвечает уровню теоретических научно-технических решений и практических технологических принципов современной электротехники, что, несомненно, тормозит технический прогресс в электроэнергетике. Это непосредственным образом отражается на реализации широко декларируемых положений об энергосбережении и энергоэффективности как в потреблении, так и в процессах передачи и распределения электроэнергии [1, 2].

Потери электроэнергии ΔW в электроустановках ЭССЭ при передаче, распределении и потреблении электроэнергии – это с точки зрения закона сохранения энергии неизбежные энергетические и экономические затраты на обеспечение физической сущности названных технологических процессов. Можно констатировать, что эти затраты, в частности связанные с выделением тепла, за исключением его полезного использования, наносят вред как самому электрооборудованию, так и окружающей среде.

Поэтому несмотря на то, что проблема снижения суммарных потерь электрической мощности и энергии (ПЭМЭ) в электроэнергетике всегда была и есть в центре внимания эксплуатации, научных исследований, проектирования и конструирования новых электроустановок и процессов, можно констатировать ее

Лолита Меджидовна Инаходова (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Алексей Юрьевич Андреев, студент.

Александр Андреевич Казанцев, студент.

непреходящую актуальность и необходимость поиска новых решений.

В современных условиях потери электроэнергии и мощности можно существенно снизить применением в конструкциях силовых трансформаторов (СТ) следующих инновационных решений:

1. Использование эффекта сверхпроводимости (СП) низко- и высокотемпературной (НТСП, ВТСП) для кардинального уменьшения нагрузочных потерь в обмотках СТ [3, 4].

2. Внедрение новых эффективных способов формирования основного магнитного потока СТ с помощью аморфных ферромагнитных материалов (АФМ) и перспективных бессердечниковых конструкций СТ для значительного (в 5–6 раз) снижения потерь холостого хода трансформатора [5,6].

3. Применение комбинированной конструкции, сочетающей в себе применение АФМ для производства магнитопровода и материалов, обладающих ВТСП-эффектом для изготовления обмоток СТ [1].

Силовой трансформатор является наиболее ответственной и дорогостоящей электроустановкой в ЭССЭ, а применение новых материалов увеличивает его стоимость. Поэтому необходимо, чтобы этот элемент сети функционировал с высокой надежностью и стабильностью. Согласно статистике, наиболее опасным возмущением, действующим на СТ, считается протекание через него тока короткого замыкания (КЗ) СТ. Внутренние повреждения обмоток, связанные с изоляционными факторами и с недостаточной стойкостью обмоток при протекании токов КЗ, являются самыми опасными с точки зрения длительности недоотпуска электроэнергии, финансовых потерь и возможности восстановления трансформаторного электрооборудования, т. е. его ремонтпригодности [7].

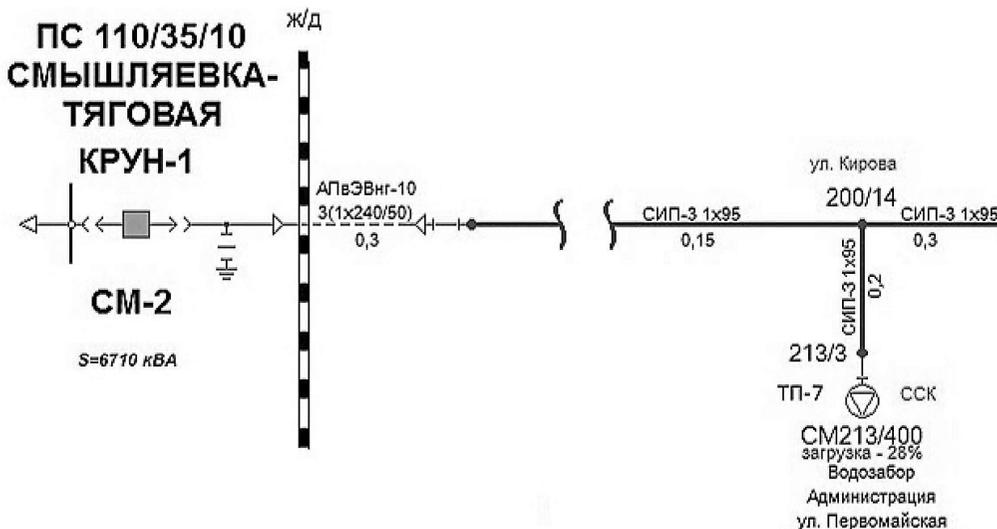


Рис. 1. Участок схемы «Смышляевка – Тяговая» ЗАО «ССК»

В данной работе проведено моделирование аварийного режима с расчетами токов КЗ на участке сети «Смышляевка – Тяговая» АО «Самарская сетевая компания» на напряжение 10 и 20 кВ (рис. 1). Для расчета токов КЗ использовались паспортные и расчетные характеристики СТ напряжением 10, 20 кВ. Значения характеристик для традиционных силовых трансформаторов (ТСТ) с магнито-

проводом из электротехнической трансформаторной стали SiFe и аморфных высокотемпературных сверхпроводниковых трансформаторов (АВТСТ), магнитопровод которых изготавливается из АФМ, а обмотки выполнены из материалов, обладающих ВТСП-эффектом, приведены в табл. 1.

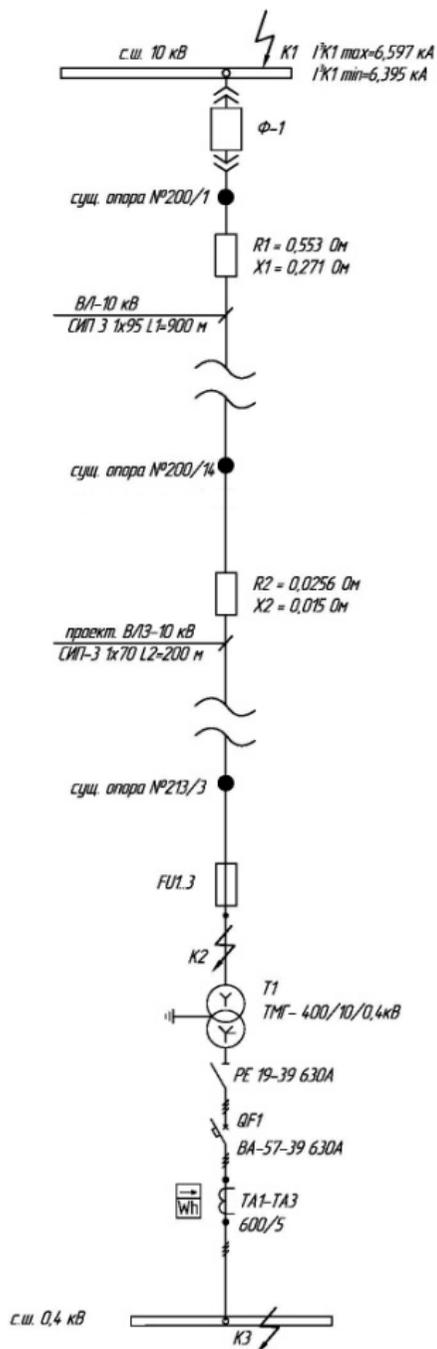


Рис. 2. Схема замещения рассматриваемого участка сети

**Паспортные характеристики трансформаторов традиционной
и инновационной конструкций**

Тип трансформатора	U _{вн} , кВ	$\Delta U_{кз}$, %	$I_{хх}$, %	$\Delta Q_{кз}$, Вар	$\Delta P_{кз}$, Вт	$\Delta Q_{хх}$, Вар	$\Delta P_{хх}$, Вт	$S_{ном}$, кВА
ТМ-400/10	10	4,5	1,8	18000	5500	4000	900	400
АВТСТ-400/10	10	1,75	0,18	7317,07	2235,77	223,46	174,76	400
ТМ-400/20	20	5,36	1,63	19368,00	6127,00	4456,00	928,50	400
АВТСТ-400/20	20	2,08	0,16	14774,34	2490,65	248,94	180,29	400

Для оценки токов КЗ из схемы «Смышляевка – Тяговая» был взят участок магистральной линии Ф-2, выполненной проводом марки СИП-3 сечением 95 мм² от опоры 200/1 до опоры 200/14, и отпайка от опоры 200/14 до ТП СМ213/400, также выполненная проводом марки СИП-3 сечением 95 мм². Схема замещения с расчетными значениями при напряжении 10 кВ представлена на рис. 2. Значения токов КЗ на шинах ПС «Смышляевка – Тяговая» в точке К1 являлись исходными, на линии и на шинах 0,4 кВ ТП СМ213/400 в точках К2 и К3 соответственно были рассчитаны для различных типов трансформаторов и величин напряжений.

Результаты расчетов токов КЗ на линии в точке К2 схемы замещения (см. рис. 2) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные токи КЗ в точке К2

Напряжение, кВ	I_k , кА
10	5,2
20	5,4

Из таблицы видно, что при изменении напряжения с 10 кВ на 20 кВ ток КЗ на линии, выполненной проводом марки СИП-3 сечением 95 мм², увеличивается незначительно.

Расчет сопротивления трансформатора выполнялся по следующим выражениям:

$$r_{тр} = u_k U_{ном.тр}^2 / S_{ном.тр}^2;$$

$$z_{тр} = P_k U_{ном.тр}^2 / (100 S_{ном.тр});$$

$$x_{тр} = \sqrt{z_{тр}^2 - r_{тр}^2}.$$

Результаты расчетов сопротивлений трансформаторов представлены в табл. 3.

Расчетные сопротивления трансформаторов

Тип трансформатора	$Z_{тр}$	$r_{тр}$	$x_{тр}$
ТМ-400/10	12,4	3,7	11,8
АВТСТ-400/10	4,8	1,5	4,6
ТМ-400/20	53,6	15,3	51,4
АВТСТ-400/20	20,8	6,2	19,8

Из таблицы видно, что сопротивление трансформатора АВТСТ значительно меньше сопротивления традиционного трансформатора марки ТМ.

Результаты расчетов токов КЗ на шинах 0,4кВ ТП СМ213/400 в точке КЗ схемы замещения (см. рис. 2) приведены в табл. 4 и на рис. 3.

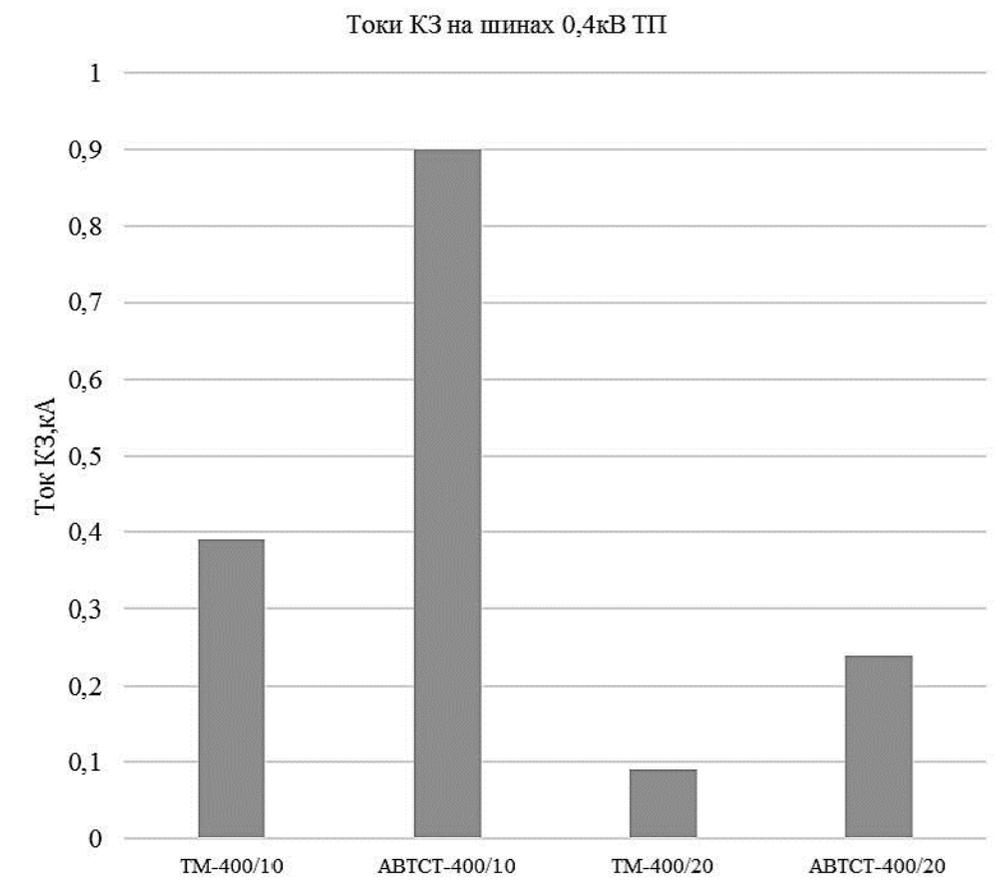


Рис. 3. Результаты расчетов токов КЗ на шинах 0,4 кВ ТП СМ213/400 в точке КЗ

Результаты расчетов токов КЗ на шинах 0,4 кВ ТП

Тип трансформатора	$I_{к3}$, кА
ТМ-400/10	0,39
АВТСТ-400/10	0,90
ТМ-400/20	0,09
АВТСТ-400/20	0,24

Из табл. 4 и рис. 3 видно, что при первичном напряжении 20 кВ на шинах трансформаторов 0,4 кВ токи КЗ значительно меньше, чем при напряжении 10 кВ у обоих типов трансформаторов. Сравнивая значения токов КЗ между трансформаторами, можно констатировать, что у АВТСТ при одинаковых условиях работы значения токов КЗ почти в 2,5 раза больше, нежели у трансформатора с традиционной конструкцией.

Выводы

1. При изменении напряжения с 10 кВ на 20 кВ ток КЗ на линии, выполненной проводом марки СИП-3 сечением 95 мм², увеличивается незначительно.
2. Активное, реактивное и полное сопротивление аморфных высокотемпературных сверхпроводниковых трансформаторов (АВТСТ), магнитопровод которых изготавливается из АФМ, а обмотки выполнены из материалов, обладающих ВТСП-эффектом, значительно меньше сопротивления традиционного трансформатора марки ТМ.
3. При первичном напряжении 20 кВ на шинах трансформаторов 0,4 кВ токи КЗ значительно меньше, чем при напряжении 10 кВ у обоих типов трансформаторов.
4. У АВТСТ при одинаковых условиях работы значения токов КЗ на шинах 0,4 кВ почти в 2,5 раза больше по сравнению с трансформатором с традиционной конструкцией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдштейн В.Г., Инаходова Л.М., Казанцев А.А. О проблемах энергосбережения и повышения энергоэффективности при применении современных силовых трансформаторов // Научно-технический журнал «Известия высших учебных заведений. Электромеханика». – Новочеркасск: ЮРГПУ, 2014. – № 5. – С. 107-111.
2. Савинцев Ю.М. Анализ состояния производства в РФ силовых масляных СТ I-III габаритов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 1. – С. 43-53.
3. Александров Н.В. Исследование влияния сверхпроводниковых трансформаторов на режимы электроэнергетических систем: Автореферат дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.14.02. – Новосибирск: НГТУ, 2014.
4. Гольдштейн В.Г., Инаходова Л.М., Казанцев А.А., Молочников Е.Н. Анализ эксплуатационных свойств трансформаторов с сердечниками из аморфных материалов и защита их с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4 (40). – С. 149-157.
5. Кузнецов Д.В., Гольдштейн В.Г. Совершенствование концепции и методов организации энергообеспечения мегаполисов // Промышленная энергетика. – 2014. – № 2.
6. Манусов В.З., Александров Н.В. Ограничение токов короткого замыкания с помощью трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками // Известия ТПУ. –

2013. – № 4. – С. 100-105.

7. *Berger A., Cherevatskiy S., Noe M., Leibfried T.* Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers // Journal of Physics: Conference Series 234. 2010.

Статья поступила в редакцию 16 января 2017 г.

CALCULATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF CURRENT SHORTAGE OF POWER TRANSFORMERS INNOVATIVE DESIGN

L.M. Inahodova, A.Y. Andreev, A.A. Kazantzev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

New more advanced and efficient power transformers compared with existing designs for applications in distribution networks and Russian power systems are considered. The calculation of some emergency operation networks of 10 kV and 20 kV with new designs of transformers in the scheme of the existing electrical network is made. A comparative analysis of the calculated resistance of transformers of various designs and short-circuit currents on the buses of high and low voltage is done. The need to address the problems of increasing short-circuit current in the application of modern energy-efficient designs of power transformers is stated.

Keywords: *transformer, energy-saving, short-circuit, loss of efficiency, amorphous magnetic materials, high-temperature superconducting materials.*

*Lolita M. Inahodova (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.
Alexey Y. Andreev, student.
Alexander A. Kazantzev, postgraduate student.*