

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРОВ С СЕРДЕЧНИКАМИ ИЗ АМОРФНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЗАЩИТА ИХ С ПОМОЩЬЮ НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ*

В.Г. Гольдштейн, Л.М. Инаходова, А.А. Казанцев, Е.Н. Молочников

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

E-mail: kazantzev@63.ru

Излагается описание зарубежного опыта эксплуатации, конструкционные особенности трансформаторов с аморфным магнитопроводом. Представлено технико-экономическое обоснование их использования в распределительных сетях РФ. Приведены результаты моделирования замены традиционных трансформаторов на трансформаторы с сердечником из аморфной стали. Отмечена необходимость улучшения защиты от перенапряжений с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений.

***Ключевые слова:** аморфные трансформаторы, аморфный сплав, энергосбережение, магнитопровод, нелинейные ограничители перенапряжений.*

Экономия электрической мощности и энергии является важнейшим направлением развития современных электрических сетей и систем электроснабжения (ЭССЭ). Особое значение это направление приобрело в связи необходимостью повышения энергоэффективности использования электроэнергии и реализации программ энергосбережения. Суммарные потери электрической мощности и энергии (ПЭМЭ) являются одним из ключевых критериев результативности энергосбережения, которую вряд ли можно считать положительной даже в ведущих развитых странах и энергообъединениях.

Так, например, в течение последних десяти лет Федеральная электросетевая корпорация США оценивает потери в своих распределительных сетях средних и низких классов напряжения на уровне $8\div 11$ %. Можно констатировать, что этот уровень потерь для линий электропередачи, являющийся характерным средним значением для промышленно развитых стран мирового сообщества, нельзя признать отвечающим современным требованиям.

Поэтому несмотря на то, что проблема снижения ПЭМЭ в электроэнергетике всегда была и есть в центре внимания эксплуатации, научных исследований, проектирования и конструирования новых электроустановок и процессов, можно констатировать ее непреходящую актуальность и необходимость поиска новых решений.

Компьютерные эксперименты, проведенные в ряде исследований в России в

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (государственный контракт 14.516.11.0111 от 14.10.2013).

Валерий Геннадьевич Гольдштейн (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

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

Александр Андреевич Казанцев, студент.

Евгений Анатольевич Молочников, аспирант.

2007÷2012 гг. для характерных типичных режимов и конфигураций ЭССЭ 10 кВ и ниже, показали, что обобщенные результаты по потерям мощности оцениваются от 11 до 27,5 % по различным регионам. Аналогичные показатели можно констатировать и в странах Евросоюза, где по отдельным группам электроустановок, в частности в трансформаторах распределительных сетей, они достигают уровня 17 % от общего валового потребления, а иногда существенно превышают названные выше значения.

Таким образом, зарубежный и отечественный опыт говорит о необходимости дальнейшей интенсификации исследований и реализации применения эффективных с точки зрения снижения потерь режимных и организационных мероприятий. Обладая в этом направлении большими резервами, они при технически грамотном и квалифицированном использовании всегда давали и будут давать значительные положительные результаты в экономии потерь. Практически ни одно энергообъединение ни в нашей стране, ни за рубежом не может гарантировать, что его технико-экономический потенциал в этом направлении реализован полностью.

Однако кардинальное снижение ПЭМЭ может быть получено только на основе широкого применения инновационного электрооборудования, обладающего высокоэффективными характеристиками в основных электроэнергетических технологических процессах производства, передачи и преобразования параметров электрической энергии. Из большого числа типов, групп и конструкций таких электроустановок можно выделить управляемые источники реактивной мощности, линии электропередачи, силовые трансформаторы (СТ) и другие электроустановки, использующие эффект высокотемпературной сверхпроводимости, трансформаторы ЭССЭ с сердечниками из инновационных аморфных сплавов (АМТ) и др.

С технико-экономической точки зрения применение АМТ в настоящее время является одним из наиболее перспективных путей снижения ПЭМЭ. Об этом говорит опыт их эксплуатации в США, Индии, Японии, Норвегии, Словакии и др.

АМТ впервые появились в США в конце прошлого столетия, тогда же началось их промышленное производство с ростом по общему количеству ~ на 10 % в год и доходностью от продаж, достигающей 40÷50 %.

Аморфный сплав, также известный как металлическое стекло, имеет некристаллическую, беспорядочную структуру. В его состав входят железо, никель, кобальт, хром и марганец и некоторые другие металлы (75÷85 %) с добавлением небольшого количества (15÷20 %): бора, углерода, кремния и фосфора. Свои основные свойства, такие как низкая коэрцитивная сила, легкое намагничивание и размагничивание, низкие удельные магнитные потери, он приобретает при охлаждении расплавленно-го аморфного сплава с высокой интенсивностью, достигающей $\sim 10^6$ °К / с.

Практика создания АМТ за рубежом показала, что в настоящее время для изготовления качественных магнитопроводов технологически целесообразно использование заготовок в виде ленты шириной до 220 мм и толщиной от 0,016 до 0,035 мм.

В настоящее время для ЭССЭ России АМТ мощностью от 32 до 1000 кВА на напряжения до 10 кВ производит группа «Трансформер» (г. Москва), обеспечивая перспективы развития в данном направлении и реальную возможность эксплуатации АМТ как российской продукции в отечественной электроэнергетике.

При однозначно положительной экономической оценке этих высокоэффективных электроустановок можно отметить ряд их специфических эксплуатационных особенностей, которые должны учитываться при их широком внедрении в распределительных ЭССЭ. Прежде всего необходимо обратить внимание на значительные отличия в характере и количественных характеристиках не только диссипативных

физических процессов, происходящих в АМТ и традиционных СТ (ТСТ).

Увеличение размерных габаритов с учетом оценки геометрии и весовых показателей АМТ неизбежно приводит к увеличению их собственных емкостей и усложнению изоляционных конструкций. Это существенно повышает требования к стойкости АМТ к мощным эксплуатационным воздействиям в виде перенапряжений.

Поэтому для обеспечения надежной работы АМТ необходима результативная защита от перенапряжений с помощью эффективных защитных аппаратов – нелинейных ограничителей перенапряжений как с высокой, так и с низкой стороны.

При этом необходимо особое внимание обратить на ограничение дуговых, феррорезонансных и индуктированных грозовых перенапряжений, источники которых могут дислоцироваться с обеих сторон СТ, и на возможность прихода опасных электромагнитных помех одновременно с нескольких воздушных и кабельных линий электропередачи. Это накладывает дополнительные ограничения на определение таких параметров ОПН, как энергоемкость, наибольшее рабочее напряжение и др.

Проведенные предварительно компьютерные эксперименты показали, что современные ОПН 10 и 0,4 кВ могут обеспечить уровень надежности работы АМТ по перенапряжениям в соответствии с требованиями эксплуатации.

Также при проектировании систем электроснабжения с АМТ нужно иметь в виду и дополнительные механические нагрузки, так как они ~ на 50 % больше.

Анализ физических процессов и результаты эксплуатации АМТ показали, что принципиальная разница в магнитной структуре аморфных магнитных материалов и электротехнической трансформаторной стали SiFe находит отражение в одной из основных характеристик магнитопроводов СТ, которой являются потери в стали $\Delta S_{cm} = \Delta P_{cm} + j\Delta Q_{cm}$, где ΔP_{cm} и ΔQ_{cm} приближенно определяются значениями активной и реактивной мощности в режиме холостого хода (XX).

При этом зависимость их магнитных потерь от частоты близка к квадратичной и, кроме того, для АМТ характерно насыщение, особенно на высоких частотах.

Суммарные потери P_{xx} в режиме XX (при номинальных значениях первичного напряжения и частоты) с учетом тока в обмотке I_{xx} можно записать в виде $\Delta P_{xx} = \Delta P_{cm} + I_{xx}^2 r_1$, где r_1 – активное сопротивление первичной обмотки. Здесь не учтены малые диэлектрические потери из-за несовершенства изоляции, электромагнитные воздействия от соседних объектов и др. Пользуясь известными данными, можно констатировать, что удельные значения активных потерь XX равны 0,9÷1,3 Вт/кг и 0,21÷0,26 Вт/кг соответственно для аморфных магнитных материалов и традиционной холоднокатаной электротехнической стали.

Известно несколько механизмов возникновения потерь в стали, в которых определяющую роль играют макро- и микровихревые токи, возникающие при изменении магнитного потока. Поэтому для объективного анализа ПЭМЭ в АМТ и ТСТ целесообразно его проведение в статической и динамической формах, то есть по паспортным параметрам и, соответственно, по данным эксплуатации, измерений и компьютерных экспериментов. Для статического анализа в табл. 1 приведены паспортные данные СТ 10 кВ. Значения для ТСТ с магнитопроводом из электротехнической трансформаторной стали SiFe и АМТ разделены знаком «/».

Оценка данных табл. 1 позволяет констатировать, что активные потери в стали в АМТ в 3,5÷5, а реактивные – в 12÷20 раз меньше, чем у основного состава отечественного парка ТСТ. Кроме очевидного снижения активных потерь в стали необходимо отметить еще и то, что за счет значительного уменьшения тока XX у АМТ также снизятся потери полной и, разумеется, активной и реактивной мощности в питающих ЛЭП.

Паспортные показатели для традиционных / аморфных трансформаторов

$S_{ном}$, кВА	ΔP_{xx} , Вт	ΔQ_{xx} , Вар	$\Delta P_{кз}$, Вт	$\Delta Q_{кз}$, Вар	I_{xx} , %	$U_{кз}$, %
25	100/28 = 3,7	784/77,5	600/480	112,5/110,25	3,3/0,31	4,5/4, 41
40	140/39 = 3,7	1255/120	900/769	180/176,8	3,1/0,3	4,5/4,42
63	214/45 = 5,8	1977/150,75	1667/1211	283,5/283,5	2,8/0,25	4,5/4, 42
100	305/64 = 4,85	2500/200	1970/1617	4500/4420	2,5/0,2	4,5/4,5
160	415/90 = 4,5	2520/256	2422/2223	720/704	2,2/0,16	4,5/4,4
250	580/128 = 4,5	4750/233	3100/3129	1125/1092,5	1,9/0,093	4,5/4,37
400	830/161 = 5,15	5600/312	4400/4457	1800/1800	1,6/0,078	4,5/4,5
630	1200/238 = 5,03	6800/409	6200/6353	3780/3817,8	1,3/0,074	6,0/6,06
1000	1792/361 = 4,9	9000/677	9080/9386	70000/61700	0,9/0,0677	7,0/6,17
1600	2100/490 = 4,3	1600/1084,8	14300/14337	9600/9687	1,0/0,678	6,0/6,06
2500	2700/550 = 4,9	2000/1400	21000/21078	15000/15175	0,8/0,56	6,0/6,07

Общие тенденции изменения потерь КЗ, которые соответствуют режиму номинальной загрузки СТ и отражают процессы, связанные с нагревом обмоток при протекании тока нагрузки, для гаммы приведенных в таблице 1 типов СТ по потерям активной мощности $\Delta P_{кз}$ состоят в том, что при малых значениях $S_{ном}$ АМТ имеют потери меньше, чем ТСТ. Далее с увеличением $S_{ном} > 250$ кВА потери $\Delta P_{кз}$ в АМТ становятся больше. Конечно, в данном случае речь идет о номинальной загрузке СТ. При меньших нагрузках это соотношение будет изменяться.

Что касается потерь реактивной мощности $\Delta Q_{кз}$, то они для обоих видов СТ практически незначительно отличаются, хотя по абсолютной величине они значительно больше, чем $\Delta P_{кз}$, и, следовательно, их влияние на потери в питающих линиях практически одинаково.

В целом оценка результатов даже только статического анализа позволяет уверенно говорить о перспективе эффективного использования АМТ в обозримом будущем развития ЭССЭ с напряжениями до 10 кВ и мощностями до 2500 кВА. При этом нужно иметь в виду, что реальная средняя нагрузка СТ в отечественных ЭССЭ в основном не превышает 70 % от номинальной.

Отметим также, что ежегодные затраты на обслуживание одного среднего по мощности из ряда распределительных ТСТ, представленных в табл. 1, составляют примерно 8 % от его первоначальной стоимости. Опыт эксплуатации в США на протяжении уже более 20 лет говорит о том, что аналогичные затраты для АМТ не превосходят названного выше значения. Более полную и практически исчерпывающую информацию для сравнения АМТ и ТСТ дает динамическая оценка с помощью компьютерных экспериментов и данных эксплуатации.

Поэтому для компьютерных экспериментов был использован фрагмент сети 10 кВ ОАО «Самаранефтегаз» (рис. 1), в котором смоделирована замена традиционных СТ на АМТ на восьми трансформаторных подстанциях. Данные об этой замене по маркам и номинальным мощностям СТ приведены в табл. 2.

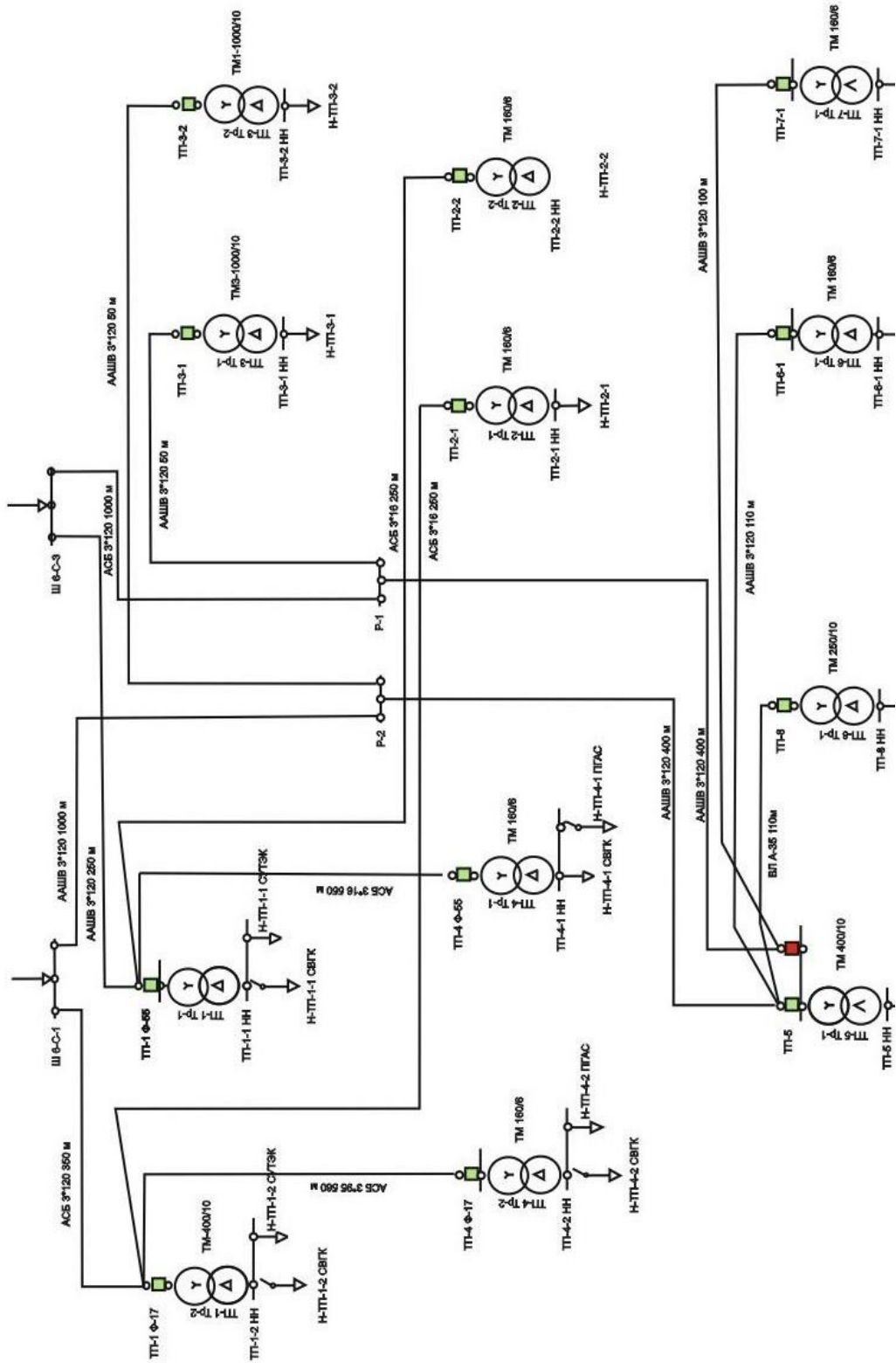


Рис. 1. Фрагмент сети 10 кВ ОАО «Самарнефтегаз»

Замена традиционных СТ в сети 10 кВ на АМТ

ТП-1	ТМ-400/10	АТМГ-400/10
ТП-4	ТМ-160/10	АТМГ-160/10
ТП-5	ТМ-400/10	АТМГ-400/10
ТП-3	ТМ-1000/10	АТМГ-1000/10
ТП-2	ТМ-100/10	АТМГ-100/10
ТП-6	ТМ-100/10	АТМГ-400/10
ТП-8	ТМ-250/10	АТМГ-250/10
ТП-7	ТМ-100/10	АТМГ-100/10

Физической основой компьютерных экспериментов является определение потерь активной и реактивной мощности в АМТ и ТСТ по известным выражениям:

$$\Delta P_{mp} = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \cdot k_z^2,$$

где k – коэффициент загрузки;

$$\Delta Q_{mp} = \Delta Q_{xx} + \frac{U_{кз\%}}{100\%} \cdot S_{ном} \cdot k_z^2, \quad \Delta S = \Delta P_{xx} + \Delta Q_{xx}.$$

Оценим эффективность применения АМТ по сравнению с ТСТ, определяя потери только в трансформаторах схемы на рис. 1, при допущении равенства относительной загрузки всех трансформаторов. Обоснование этого допущения диктуется целью, поставленной в начале работы. Можно предположить, что потери во множественной части схемы лишь незначительно изменят оценку общей эффективности. Частная оценка собственно трансформаторной части, по мнению авторов, более значимо отразит экономическую выгоду от применения обсуждаемых мероприятий.

Порядок проведения компьютерного эксперимента включает следующие позиции:

1) для заданного значения, равного относительной загрузке для каждого трансформатора, рассчитывается абсолютная величина потерь соответственно для АМТ и ТСТ;

2) рассчитывается величина суммарных относительных потерь

$$\Delta \Pi_{\%} = \frac{\sum_{i=1}^8 \Delta S_i}{\sum_{i=1}^8 S_{ni}};$$

3) определяется условная эффективность

$$\mathcal{E}_{\%} = 1 - \Delta \Pi_{\%}.$$

Для сравнительной оценки эффективности применения трансформаторов АМТ проведены компьютерные эксперименты по расчету потерь электрической мощности на участке сети (рис. 2) ОАО «Самаранефтегаз». Чтобы иметь базу для сравнения и сопоставления результатов, были приняты следующие условия.

1. Рассматривались два варианта: в первом все трансформаторы имели исполнение ТСТ, во втором – АМТ.
2. Одинаковая нагрузка для 1-го и 2-го вариантов изменялась от 0 до 100 % номинальной мощности каждого трансформатора.

Результаты проведенных экспериментов представлены графиками (рис. 2, рис. 3). Видно, что энергоэффективность трансформаторов из аморфного сплава выше, чем энергоэффективность трансформаторов с традиционным исполнением магнитопровода.

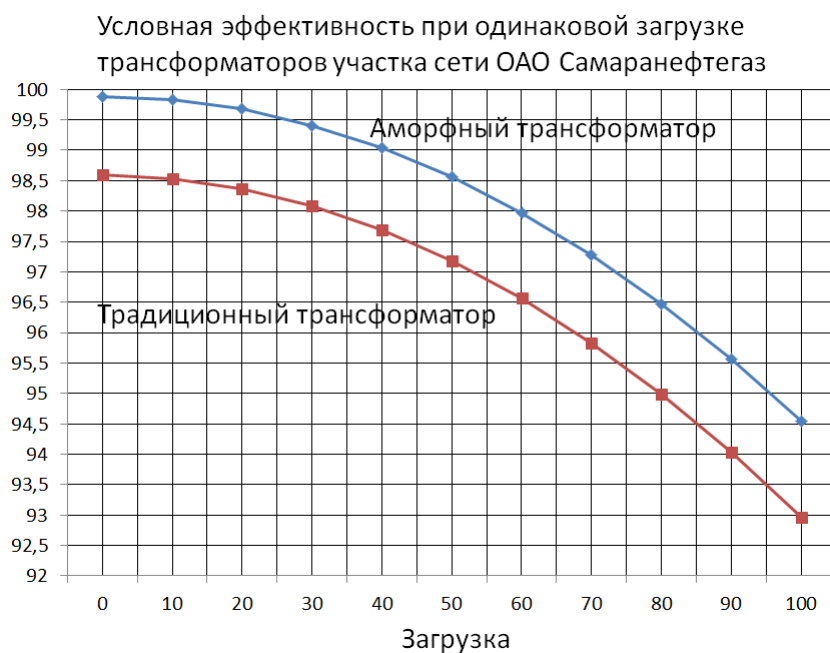


Рис. 2. График зависимости суммарной эффективности трансформаторов от коэффициента загрузки

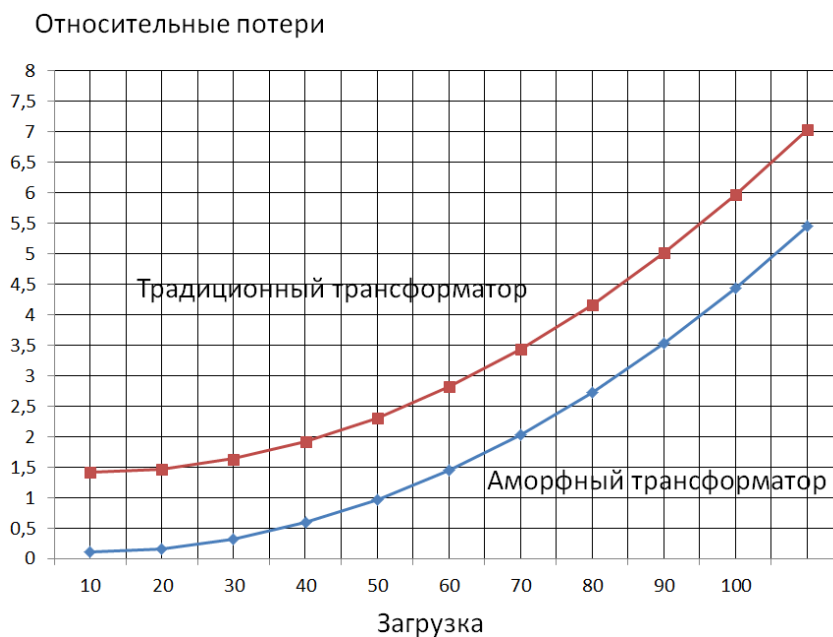


Рис. 3. График зависимости суммарных относительных потерь трансформатора от общего коэффициента загрузки

Недостатком сердечников из аморфных материалов является их более высокая стоимость по сравнению с традиционными материалами: так, у японской фирмы Hitachi эта разница составляет 15÷20 %, а у фирмы «Трансформер» разница в цене между ТСТ и АМТ достигает 30÷35 %.

Таким образом, делаем вывод, что введение в эксплуатацию силовых распределительных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов является одним из наиболее перспективных путей снижения технических потерь энергосистем.

Производственные способности отечественных производителей в изготовлении «аморфных» трансформаторов развиваются быстрым темпом и способны обеспечить спрос на данный тип трансформаторов.

Выводы

1. Ток ХХ и нагрев сердечника у АМТ по сравнению с ТСТ ниже на 70 и 60 % соответственно.
2. Аморфные металлические материалы насыщаются при низких уровнях потока 1,56 Тл по сравнению с 2,04 Тл для традиционных материалов, что требует увеличения активной части в конструкции АМТ.
3. Аморфные металлические материалы хрупки, требуют специальной обработки в процессе изготовления, имеют низкий коэффициент заполнения конструкции – до 85 % по сравнению с 95÷98 % для стальных сердечников, что увеличивает нагрузочные потери и усложняет технологический процесс изготовления АМТ.
4. Низкие плотность магнитного потока и коэффициент заполнения приводят к увеличению сердечника и потерь в обмотке (проводнике), к увеличению производственных издержек.
5. Для обеспечения уровня надежности работы АМТ по перенапряжениям в соответствии с требованиями эксплуатации требуется установка современных ОПН с высокой 10 кВ и низкой 0,4 кВ сторон СТ.
6. Недостатком сердечников из аморфных материалов является их более высокая стоимость по сравнению с традиционными материалами.
7. Аморфные металлы имеют следующие преимущества: легче намагничиваются (низкая коэрцитивность и высокая проницаемость); имеют низкие магнитные потери (низкая коэрцитивность, высокая проницаемость и высокое сопротивление); быстрее перемагничиваются (из-за низких магнитных потерь); имеют универсальные магнитные свойства после изготовления и широкий диапазон изменения химического состава.
8. Активные потери в стали в АМТ в 3,5÷5, а реактивные – в 12÷20 раз меньше, чем у основного состава отечественного парка ТСТ.
9. За счет значительного уменьшения тока ХХ у АМТ снижены потери полной и, разумеется, активной и реактивной мощности в питающих ЛЭП.
10. Ежегодные затраты на обслуживание АМТ не превосходят аналогичных затрат ТСТ, которые составляют примерно 8 % от начальной стоимости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Инаходова Л.М., Казанцев А.А.* Сравнительный анализ технико-экономических показателей трансформаторов с различным исполнением сердечника // Актуальные научные вопросы современности: Материалы международной научно-практической конференции. – Липецк, 2013. – С. 19-21.
2. *Инаходова Л.М., Казанцев А.А.* Исследование силового трансформатора с аморфным магнитопроводом // Электрика. – 2013. – № 5.

3. *Савиццев Ю.М.* ЭТК Русский трансформатор. Современные трансформаторы: Анализ состояния производства в РФ силовых масляных трансформаторов I – III габарита. – URL: http://www.rus-trans.com/index.php?ukey=auxpage_sovremennye-transformatory Дата обращения: 07.09.2012.
4. Amorphous core transformers of reducing losses of efficiency. – URL: http://www.iceach.com/htm_news/2010-8/4235_857696.htm Дата обращения: 25.08.2010.
5. Твердый снаружи, аморфный внутри. – URL: <http://www.energyland.info/analitic-show-96015.htm>

Статья поступила в редакцию 26 октября 2013 г.

PERFORMANCE ANALYSIS OF PROPERTIES OF POWER TRANSFORMERS WITH A CORE OF AMORPHOUS MATERIALS AND PROTECTION THEM USING SURGE ARRESTERS

V.G. Goldstein, L.M. Inahodova, A.A. Kazantzev, E.N. Molochnikov

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

This paper was supported by the Ministry of Education of the Russian Federation (state contract 14.516.11.0111 from 14.10.2013 y.). It describes the foreign operating experience and design features of amorphous magnetic circuit transformers. The feasibility of their use in the distribution networks of the Russian Federation is stated. The results of the simulations to replace traditional transformers with amorphous-steel cor transformers are presented. The necessity to improve overvoltage protection by means of surge arresters is pointed out.

Keywords: *amorphous transformers, amorphous alloy, energy saving.*

*Valery G. Goldstein (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Lolita M. Inahodova (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.
Alexander A. Kazantzev, Student.
Evgeniy A. Molochnikov, Postgraduate Student.*