

Поступила в редакцию 02.09.2020
УДК 621.311.001.57

DOI 10.46960/2658-6754_2020_3_64

В.Г. Гольдштейн, Л.М. Инаходова, А.А. Казанцев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИННОВАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ КОМПАНИЙ

Самарский государственный технический университет
Самара, Россия

В современных условиях потери электроэнергии и мощности можно снизить применением в конструкциях силовых трансформаторов следующих инновационных решений: использование эффекта сверхпроводимости низко- и высокотемпературной, внедрение новых эффективных способов формирования основного магнитного потока с помощью аморфных ферромагнитных материалов и применение комбинированных конструкций силовых трансформаторов, сочетающих в себе перечисленные выше решения. В работе было выполнено моделирование участка сети нефтегазового месторождения с заменой существующих масляных трансформаторов было проведено в ПК *RastrWin3*. Была оценена эффективность применения инновационных трансформаторов по сравнению с масляными. Были построены графики зависимости коэффициента полезного действия от коэффициента загрузки (k_z) для различных видов трансформаторов. Результаты моделирования показали, что энергоэффективность инновационных трансформаторов значительно выше, чем у трансформаторов с традиционным исполнением магнитопровода.

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

I. Введение

В современных условиях с общим технологическим развитием промышленной отрасли наблюдается повышение общего объема и разветвленности энергопотребления в электрических сетях. При этом растет и уровень требований, предъявляемых к надежности бесперебойного питания и к качеству электроэнергии. Самым эффективным способом решения указанных проблем является разработка и внедрение инновационных конструкций различного электрооборудования [1-2].

Для распределительных подстанций сетей электроснабжения одним из таких решений может стать применение силовых распределительных трансформаторов, при изготовлении обмоток которых используется материал, обладающий свойством высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСТ) при определенной температуре, а при изготовлении магнитопроводов – аморфный ферритмагнитный материал (АСТ). Эти две технологии можно применять в силовом трансформаторе совместно и по отдельности, добиваясь при этом разных технических и экономических результатов [3-4]. Внедрение этих технических решений особенно актуально для трансформаторов, используемых в сильно нагруженных и ответственных системах электроснабжения объектов нефтегазодобывающей отрасли [5].

В настоящее время подобные конструкции силовых распределительных трансформаторов, которые несут в себе инновационные решения, в существующих электрических распределительных сетях не применяются. Эта ситуация вызвана отсутствием у участников отечественной электротехнической промышленности на современном этапе возможности выпуска подобного электрооборудования, а у зарубежных – по многим причинам широкий выпуск не освоен. Также существует проблема дефицита точной информации о проектировании, разработке и эксплуатации систем электроснабжения с инновационным электрооборудованием [6].

В соответствии с обозначенными вопросами, цель и направление данной работы были определены как решение вопросов расчета, разработки и проектирования распределительных электрических сетей, содержащих силовые трансформаторы с инновационной конструкцией. Это задача расчета технических характеристик и параметров силовых трансформаторов, которые только начинают осваиваться отечественной электротехнической промышленностью. При этом значения этих параметров нужны сегодня для разработки современных распределительных электрических сетей.

При выполнении расчета технических параметров инновационных конструкций силовых трансформаторов было принято решение об использовании метода экспертных оценок [7]. Использование именно этого метода в рамках текущей работы было обусловлено отсутствием заводских паспортных характеристик рассматриваемого электрооборудования. Такой подход упрощает процедуру поиска решений, связанных с разработкой, расчетом и проектированием систем электроснабжения, содержащих в себе инновационные конструкции электрооборудования. Следует отметить, что в дальнейшем возникает необходимость определения характеристик рабочих электрических режимов проектируемой электрической распределительной сети с силовыми трансформаторами, которые в ограниченном количестве изготавливаются на зарубежных предприятиях и не выпускаются в нашей стране [8-9].

При определенных условиях технические характеристики можно спрогнозировать [10]:

- применением метода экспертных оценок;
- основываясь на анализе и исследовании параметров физических процессов рассматриваемого устройства;
- по результатам сравнения аналогичных характеристик с существующими устройствами;
- исходя из результатов работы опытных и прототипных отечественных изделий;
- на основе результатов работы изделий зарубежных производителей, уже освоивших выпуск подобных технических решений.

Исходя из физических свойств инновационных материалов, применяющихся при изготовлении трансформаторов с новой конструкцией, можно выделить их преимущества по сравнению с известными решениями, получившими широкое применение:

- в силовых распределительных трансформаторах с сердечником из аморфного ферромагнитного материала происходит снижение (в несколько раз) активных потерь холостого хода;
- в силовых распределительных трансформаторах, обмотки которых выполнены с применением материала с ВТСП наблюдается сильное, многократное уменьшение продольного активного и реактивного сопротивления.

Значения параметров распределительных силовых трансформаторов 100 и 2000 кВА на номинальное напряжение 35/0,4 кВ, изучаемых в ходе работы, сведены в табл. 1 в следующих видах: с традиционным магнитопроводом (ТСТ); с аморфным магнитопроводом (АСТ); с высокотемпературными сверхпроводниковыми обмотками (ВТСТ); совмещенный вариант (АВТСТ).

Задачей исследования является прогнозирование параметров силовых трансформаторов с конструкцией инновационного типа для оценки эффективности внедрения оборудования подобного типа.

II. Материалы и методы

Для участка распределительной электрической сети выбранного нефтегазового месторождения с номинальным напряжением 35 кВ, представленного на рис. 1, был выполнен процесс моделирования работы трансформаторов с магнитопроводом из аморфного сплава (АСТ), с высокотемпературными сверхпроводниковыми обмотками (ВТСТ); совмещенный вариант с магнитопроводом из аморфного сплава и высокотемпературными сверхпроводниковыми обмотками (АВТСТ). Расчеты потерь выполнялись в ПК *RastrWin3*. Анализировались продольные и поперечные

потери активной мощности в СТ на объектах.

Таблица 1.

КПД трансформаторов при определенных значениях коэффициента загрузки

Тип	$\Delta U_{кз}, \%$	$I_{хх}, \%$	$\Delta P_{кз}, \text{Вт}$	$\Delta P_{хх}, \text{Вт}$
ТСТ-100-35/0,4	6,5	2,5	1470,0	240,0
АСТ-100-35/0,4	6,5	0,3	1470,0	67,2
ВТСТ-100-35/0,4	2,5	2,5	471,2	240,0
АВТСТ-100-35/0,4	2,5	0,3	471,2	67,2
ТСТ-2000-35/0,4	7,5	1,0	23500,0	3900,0
АСТ-2000-35/0,4	7,5	0,1	23500,0	794,3
ВТСТ-2000-35/0,4	2,9	1,0	9514,2	3900,0
АВТСТ-2000-35/0,4	2,9	0,1	9514,2	794,3

К объектам проектирования относятся следующие:

- КТПН 35/0,4 ГП;
- КТПН 35/0,4 Гр.2;
- КТПН 35/0,4 Гр.3.

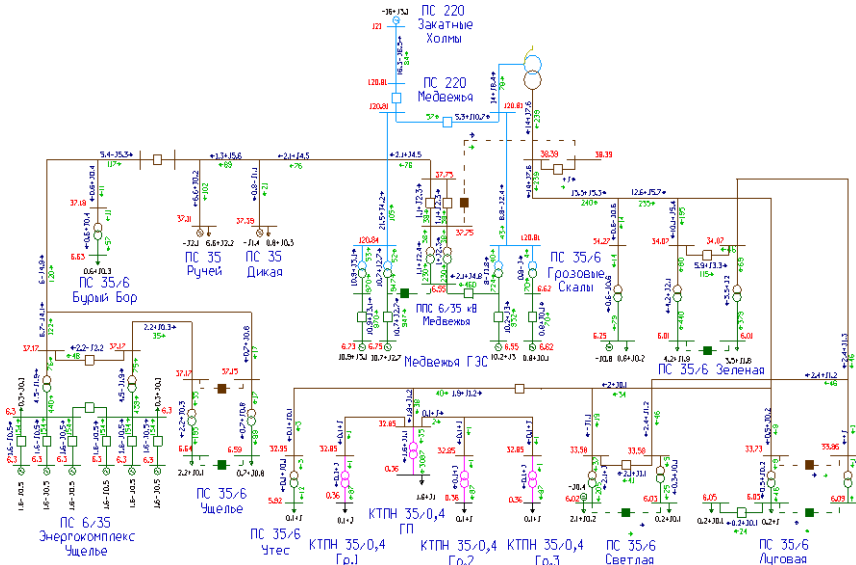


Рис. 1. Участок схемы сети нефтяного месторождения в программном комплексе *RastrWin3*

III. Результаты исследования

На диаграмме рис. 2. представлены величины потерь активной мощности для силовых распределительных трансформаторов, полученных в ходе работы. При моделировании, уровень загрузки силовых распределительных трансформаторов на участке принималась в соответствии с перспективным профилем дизайна добычи нефти месторождения.

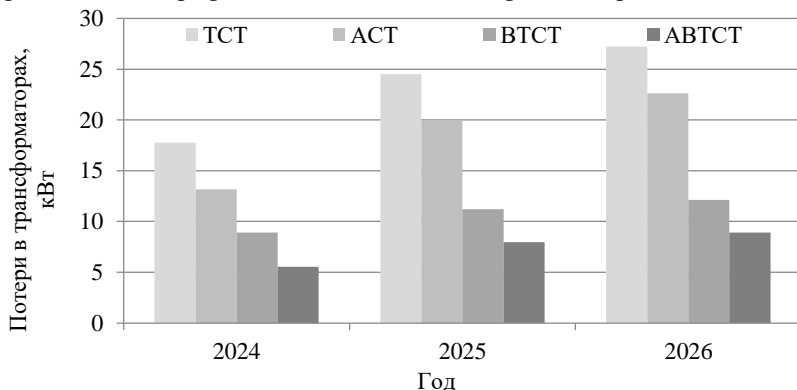


Рис. 2. Результаты расчетов потерь мощности в трансформаторах при использовании их различных видов

Далее были построены графики зависимости коэффициента полезного действия (КПД) от коэффициента загрузки (k_3) для ТСТ-100/35 и АСТ, ВТСТ, АВТСТ трансформаторов с такими же параметрами. Полученные результаты отражены в табл. 2 и представлены на рис. 3.

Таблица 2.
Максимальные значения КПД трансформаторов при соответствующих значениях k_3

Тип трансформатора	100 кВА		2000 кВА	
	η , о.е.	k_3	η , о.е.	k_3
ТСТ	0,9768	0,4	0,9904	0,4
АСТ	0,9876	0,2	0,9956	0,15
ВТСТ	0,9867	0,75	0,9939	0,7
АВТСТ	0,9929	0,4	0,9972	0,35

IV. Обсуждение результатов

Из представленных результатов можно сделать вывод о том, что коэффициент полезного действия силовых распределительных трансформаторов с современным типом конструкции значительно выше, чем у транс-

форматоров с традиционного типа. Потери активной мощности снизились относительно масляных трансформаторов на 17 % для АСТ, на 55 % для ВТСТ и 67 % для АТСТ трансформаторов.

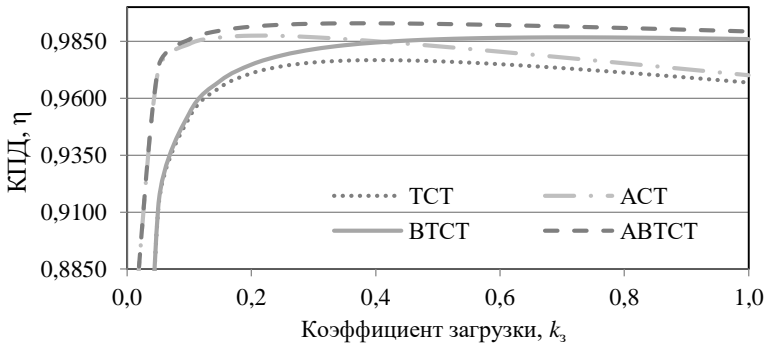


Рис. 3. Графики зависимости КПД от k_3 для различных видов трансформаторов класса напряжения 35/0,4 кВ мощность 100 кВА

Основываясь на представленных графиках, можно сделать вывод о том, что у трансформаторов с магнитопроводом из аморфного ферромагнитного материала и трансформаторов с традиционной конструкцией по мере увеличения k_3 наблюдается более активное снижение КПД, нежели у трансформаторов, в обмотках которых используется материал, обладающий высокотемпературной сверхпроводимостью ввиду больших потерь КЗ. Но у трансформаторов с аморфным магнитопроводом наибольший КПД достигается при меньшем коэффициенте загрузки по сравнению с традиционным масляным трансформатором.

У ВТСТ трансформатора КПД соответствует большему коэффициенту загрузки по сравнению с другими. Графически полученные данные коэффициентов загрузки, соответствующие максимальному значению КПД, подтверждаются расчетами:

$$k_{3\max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{xx}}{\Delta P_{K3}}}. \quad (1)$$

V. Выводы

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что внедрение энергоэффективного электрооборудования за счет снижения сопротивления элементов схемы замещения силовых трансформаторов приводит к снижению величины падений напряжения на шинах потребителя, что при некоторых граничных условиях позволяет отказаться от дополнительной установки средств компенсации реактивной мощности.

Применение современного силового трансформаторного оборудования в распределительных сетях является одним из наиболее эффективных способов снижения активных потерь и развития отечественной промышленности.

© Гольдштейн В.Г., 2020

© Инаходова Л.М., 2020

© Казанцев А.А., 2020

Библиографический список

- [1] Савинцев Ю.М. Анализ состояния производства в РФ силовых масляных трансформаторов I-III габаритов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 1. С. 43-53.
- [2] Александров Н.В. Исследование влияния сверхпроводниковых трансформаторов на режимы электроэнергетических систем. Автореферат дис. канд. техн. наук, НГТУ, Новосибирск. 2014.
- [3] Dai S., Ma T., Qiu Q., Zhu Z., Teng Y., Hu L. Development of a 1250-kVA superconducting transformer and its demonstration at the superconducting substation // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2016. Vol. 26. №. 1. P. 1-7.
- [4] Laphorn A.C., Chew I., Enright W.G., Bodger P.S. HTS transformer: Construction details, test results, and noted failure mechanisms // IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. Vol. 26. №. 1. P. 394-399.
- [5] Кузнецов Д.В., Гольдштейн В.Г. Совершенствование концепции и методов организации энергоснабжения мегаполисов. Промышленная энергетика. 2014. № 2. С. 7-12.
- [6] Манусов В.З., Александров Н.В. Ограничение токов короткого замыкания с помощью трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 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. 2010. 234. P. 1-8.
- [8] Гольдштейн В.Г., Инаходова Л.М., Казанцев А.А. О проблемах энергосбережения и повышения энергоэффективности при применении современных силовых трансформаторов // Известия Высших Учебных Заведений. Электромеханика. 2014. № 5. С. 107-111.
- [9] Гольдштейн В.Г., Инаходова Л.М., Казанцев А.А., Молочников Е.А. Анализ эксплуатационных свойств трансформаторов с сердечниками из аморфных материалов и защита их с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений // Вестник СамГТУ. Серия «Техн. науки». 2013. № 4 (40). С. 149-157.
- [10] Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Колчанова И.П., Полтавец В.Н. Зарубежные и российские разработки в области создания сверхпроводниковых электрических машин и устройств // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. 2012. № 6. С. 3-26.

V.G. Goldstein, L.M. Inakhodova, A.A. Kazantzev

**RESEARCH OF ELECTRIC MODES
WHEN USING INNOVATIVE DESIGNS
OF POWER TRANSFORMERS IN POWER SUPPLY
SYSTEMS OF OIL AND GAS COMPANIES**

Samara State Technical University
Samara, Russia

Abstract. In modern conditions, power and power losses can be reduced by using the following innovative solutions in power transformer designs: using the effect of low - and high-temperature superconductivity, introducing new effective methods for forming the main magnetic flux using amorphous ferromagnetic materials, and using combined power transformer designs that combine the solutions listed above. In this work, the simulation of a section of the oil and gas field network with the replacement of existing oil transformers was performed in the RastrWin3 PC. The efficiency of using innovative transformers in comparison with oil-based ones was evaluated. Graphs of the dependence of the efficiency coefficient on the load factor for various types of transformers were constructed. The simulation results showed that the energy efficiency of innovative transformers is significantly higher than that of transformers with a traditional magnetic circuit design.

Keywords: amorphous magnetic materials, energy efficiency, energy saving, high-temperature superconducting materials, losses, transformer.

References

- [1] Yu.M. Savintsev, “Analiz sostoyaniya proizvodstva v RF silovyh maslyanyh transformatorov I-III gabaritov [Analysis of the state of production in the Russian Federation of power oil ST I-III dimensions]”, *Elektrooborudovanie: Eksploatatsiya i Remont [Electrical equipment: operation and repair]*, no. 1, pp. 43-53, 2012 (in Russian).
- [2] N.V. Aleksandrov, “Issledovanie vliyaniya sverhprovodnikovyyh transformatorov na rezhimy elektroenergeticheskikh sistem [Investigation of the influence of superconducting transformers on the modes of electric power systems]”. Cand. of Tech. S. thesis, NSTU, Novosibirsk, Russia, 2014 (in Russian).
- [3] S. Dai, T. Ma, Q. Qiu, Z. Zhu, Y. Teng and L. Hu, “Development of a 1250-kVA superconducting transformer and its demonstration at the superconducting substation”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 1, pp. 1-7, Jan. 2016.
- [4] A.C. Laphorn, I. Chew, W.G. Enright and P.S. Bodger, “HTS transformer: Construction details, test results, and noted failure mechanisms”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 1, pp. 394-399, Jan. 2011.

- [5] D.V. Kuznetsov and V.G. Goldstein, “Sovershenstvovanie koncepcii i metodov organizacii energosnabzheniya megapolisov [Improving the concept and methods of organizing power supply to megacities]”, *Industrial Power Engineering*, no. 2, pp. 7-12, 2014 (in Russian).
- [6] V.Z. Manusov and N.V. Aleksandrov, “Current limitation by transformers with high temperature superconducting windings”, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, vol. 323, no. 4, pp. 100-105, 2013 (in Russian).
- [7] A. Berger, S. Cherevatskiy, M. Noe and T. Leibfried, “Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 234, pp. 1-8, 2010.
- [8] V.G. Goldshtein, L.M. Inahodova and A.A. Kazantzev, “Problems of saving and improving energy efficiency in applying modern power transformers”, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics. Universities’ News)*, no. 5, pp. 107-111, 2014.
- [9] V.G. Goldstein, L.M. Inahodova, A.A. Kazantzev and E.A. Molochnikov, “Performance analysis of properties of power transformers with a core of amorphous materials and protection them using surge arresters”, *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, no. 4 (40), pp. 149-157, 2013.
- [10] L.K. Kovalev, K.L. Kovalev, I.P. Kolchanova and V.N. Poltavets, “Zarubezhnye i rossijskie razrabotki v oblasti sozdaniya sverhprovodnikovyh elektricheskikh mashin i ustrojstv [Foreign and Russian developments in the field of superconducting electrical machines and devices]”, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 6, pp. 3-26, 2012 (in Russian).