

DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500

^{1,*}Мамонтов А.Н., ²Пушница К.А.¹ПАО НЛМК

Россия, г. Липецк, пл. Metallургов, 2

²Липецкий государственный технический университет

Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30

*E-mail: mamontov.anton 2015@mail.ru

ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РЕАКТОРОВ

Аннотация. В данной статье перечислены виды реакторов (токоограничивающие реакторы, сглаживающие реакторы, дугогасящие реакторы), описаны принципы преобразования электрической энергии, а также способы компенсации электрического тока; установлена периодичность осмотров, в том числе внеплановых, а также текущих и капитальных ремонтов оборудования, сформирован перечень обследуемых узлов, а также особенности проведения тепловизионной диагностики реакторов напряжением до и выше 1000 В, в том числе представлена конструкция сглаживаемого реактора напряжением 780 В, бетонного реактора напряжением 10 кВ, показаны термограммы дефектов контактных соединений; проведен расчет величин активного тока, тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, а также установившегося напряжения. В результате анализа термограмм сформирована причина возникновения дефектов токоограничивающих реакторов напряжением 10 кВ. На основе вычисленного значения $\text{tg}\delta$ составлена методика обследования реактора, проведен расчет допустимого отклонения напряжения на основе вычисленного коэффициента нелинейности. Проведен расчет экономического ущерба от отказа реактора в зависимости от величины полной мощности, токовой нагрузки и продолжительности отключения, а также сформулирован вывод об эффективности данного вида диагностики.

Ключевые слова: тепловизионный контроль, текущий ремонт, токоограничивающий реактор, диэлектрические потери, коэффициент нелинейности.

Введение. Главными вопросами, возникающими при эксплуатации электроустановок напряжением 0,4-35 кВ, являются обеспечение надежной работы потребителей, а также допустимые уровни напряжения, обеспечивающие безотказную работу электроустановок. Для снижения пульсаций, а также уменьшения либо ограничения токов короткого замыкания в сетях с глухозаземленной и изолированной нейтралью силовых трансформаторов применяют реакторы. Однако в последние годы резко увеличилось количество выходов из строя потребителей напряжением 10 кВ по причине кратковременных провалов напряжения, что говорит о невысокой эффективности работы реакторов [1, 2]. Наиболее распространенным способом диагностики в данном случае стал тепловизионный контроль.

Самым распространенным типом реакторов в электроустановках являются токоограничивающие, чуть меньшее распространение получили сглаживающие, а также дугогасящие реакторы. В данной статье мы будем рассматривать диагностику сглаживающих реакторов напряжением до 1000 В, а также токоограничивающих реакторов напряжением 10 кВ. В соответствии с [3] текущие ремонты реакторов производятся по мере необходимости, капитальные ремонты – не позднее чем через 12 лет после ввода в эксплуатацию

с учетом результатов диагностики. Внеочередные ремонты реакторов должны выполняться, если дефект в каком-либо их элементе может привести к отказу. На основании периодичности ремонтов реакторов и устанавливаются сроки проведения тепловизионной диагностики их технического состояния.

Методика. Согласно приложению № 3 РД 34.45-51.300-97 в ходе проведения тепловизионного контроля реакторов обследуются контактные соединения [4]. Рассмотрим следующий пример. В ходе проведения тепловизионного контроля на подстанции, от которой берут питание трансформаторы электролизеров, был зафиксирован дефект сглаживающего реактора напряжением 780 В. Данный реактор предназначен для сглаживания выпрямленного тока в схемах преобразователей. Он состоит из следующих основных частей: обмотки, отводов, магнитопровода, кожуха. Обмотка закрепляется между текстолитовыми опорами при помощи прокладок и реек и прессуется балками. Металлические детали имеют антикоррозионное покрытие и рассчитаны на работу в условиях умеренного климата в помещениях с естественной вентиляцией [5]. Термограмма реактора представлена на рис. 1.

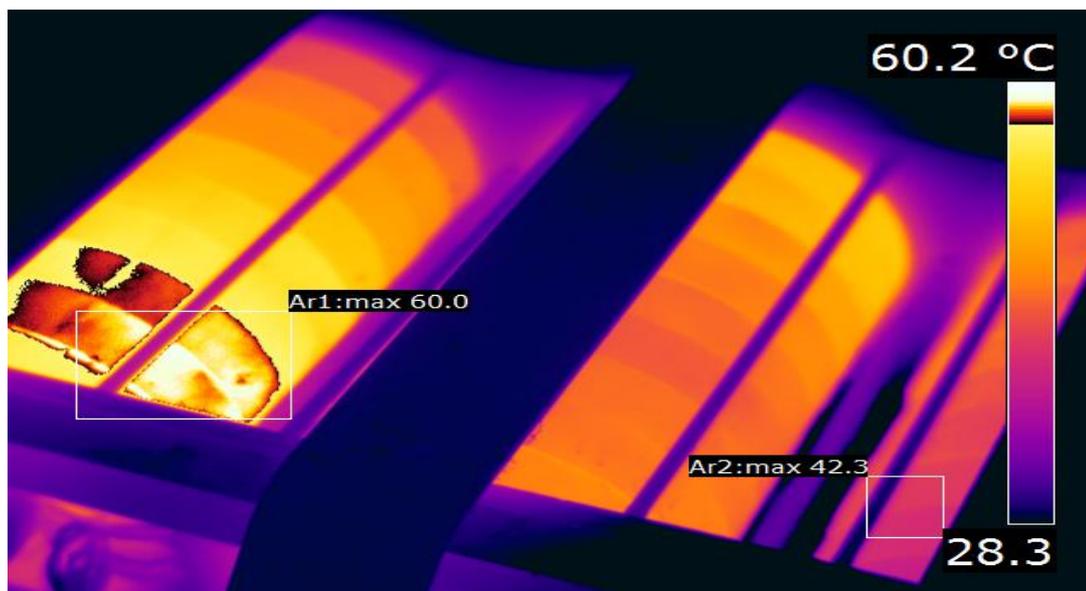


Рис. 1. Термограмма реактора напряжением 780 В

В общем виде выражение для описания режима работы реактора будет выглядеть следующим образом [6]:

$$R - (-j \cdot \omega \cdot C) = j \cdot \omega \cdot L. \quad (1)$$

При возникновении дефекта в реакторе выражение принимает вид:

$$R_1 - (-j \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta) = j \cdot \omega \cdot L. \quad (2)$$

Проведем расчет $\text{tg} \delta$ на основании данного дефекта. Энергия, выделяющаяся на поверхности реактора, равна [6]:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot s \cdot T^4 = 0,94 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot (273 + (60 - 28))^4 = 461,22, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где ε – коэффициент излучения, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана, (Вт/м²·К⁴), s – площадь поверхности нагрева, м²; T – излучаемая температура, К.

Значение активной составляющей тока I_a рассчитывается согласно формуле:

$$I_a = \left(\frac{E \cdot I_{\text{раб}}}{U_{\phi}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

где $U_{\phi} = 450$ – фазное напряжение, В; $I_{\text{раб}} = 2200$ – рабочий ток, А.

Величина тангенса угла диэлектрических потерь:

$$\text{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{I_a}{I_{\text{раб}}} \quad (5)$$

где I_p – реактивный ток, А.

Тогда установившееся напряжение определяется как:

$$U_y = U_{\phi} \cdot \text{tg} \delta. \quad (6)$$

Полученные данные запишем в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения для обмотки реактора напряжением 0,78 кВ

Номинальное напряжение, кВ	Активный ток I_a , А	Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$, %	Установившееся напряжение, кВ
0,78	36,22	1,64	0,738

Теперь рассмотрим случаи дефектов реакторов напряжением 10 кВ. В ходе проведения тепловизионного контроля на подстанциях были зафиксированы дефекты контактных соединений. Паспортные данные для каждого из реакторов сведен в табл. 2. Буквенная маркировка реакторов обозначает: Р-реактор, Б-бетонный, А-алюминиевый. Бетонный реактор представляет собой концентрически расположенные витки изолированного многожильного провода, помещенного в радиально расположенные бетонные ко-

лонки. Бетон выпускается с высокими механическими свойствами. Все металлические детали реактора изготавливаются из немагнитных материалов. Фазные катушки реактора располагаются таким образом, чтобы при собранном реакторе поля катушек были расположены встречно, что необходимо для преодоления продольных динамических усилий при коротком замыкании [7].

Данные реакторы изготавливаются для вертикальной и ступенчатой установок [7]. Термограммы изображены на рис. 2–4.

Таблица 2

Номинальные значения для реакторов напряжением 10 кВ

Тип реактора	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, кВ	Рабочий ток I_p , А
РБА-1	1000	10	300
РБА-2	1600	10	500
РБА-3	1600	10	1000

Наиболее вероятными причинами нагрева контактных соединений реакторов явились: эксплуатация в помещениях с резкими колебаниями температуры от -5 до 40 °С, поскольку данный тип реакторов наиболее чувствителен к сильным

перепадам температуры; протекание переходного напряжения в цепях автоматики высоковольтного выключателя [8–14].

Проведем расчет $\text{tg}\delta$ на основании данных дефектов. Полученные данные сведем в таблицу 3.

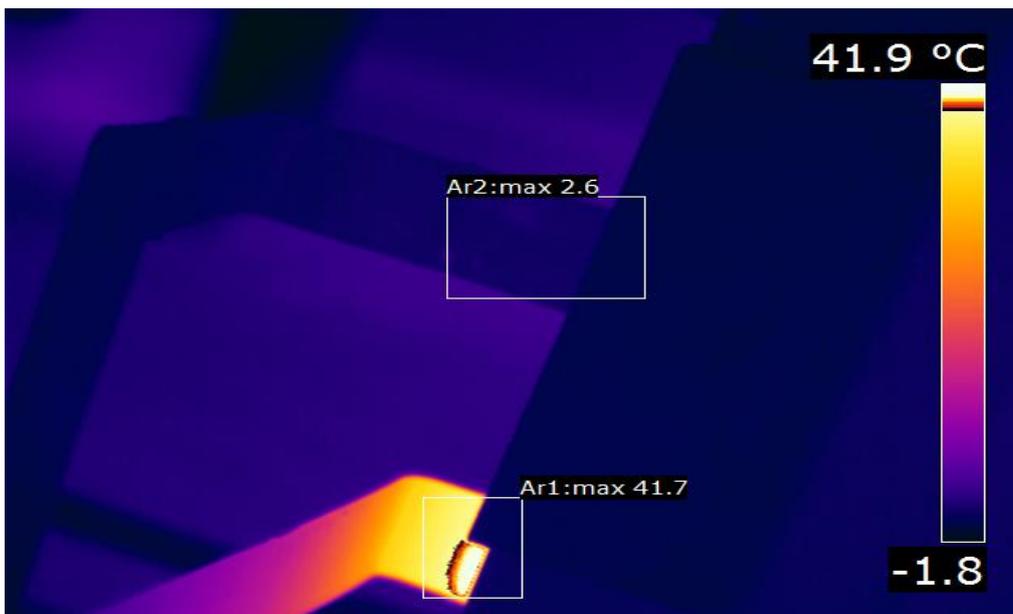


Рис. 2. Термограмма реактора РБА-1.

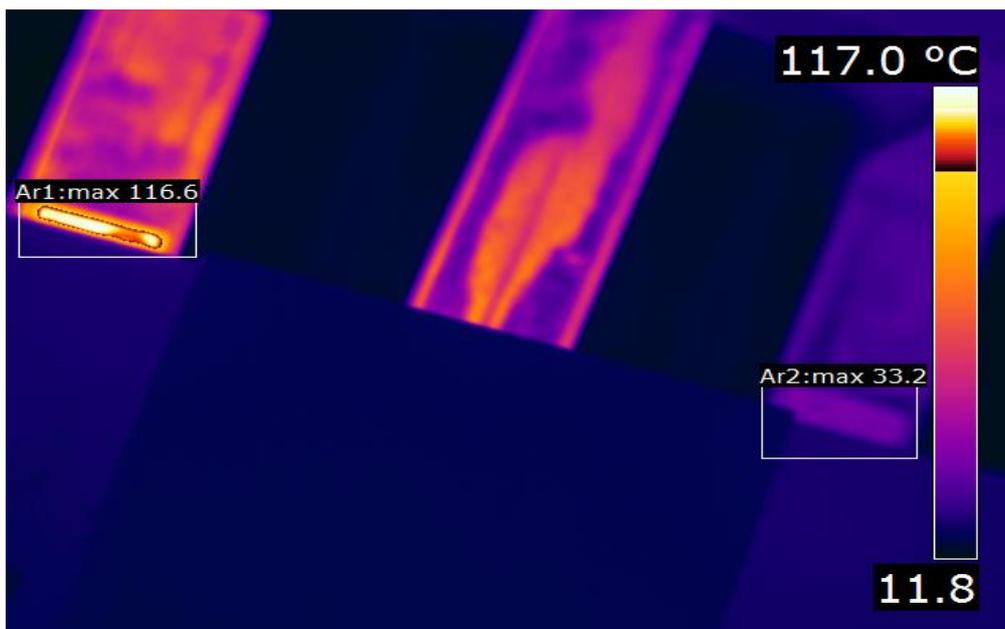


Рис. 3. Термограмма реактора РБА-2

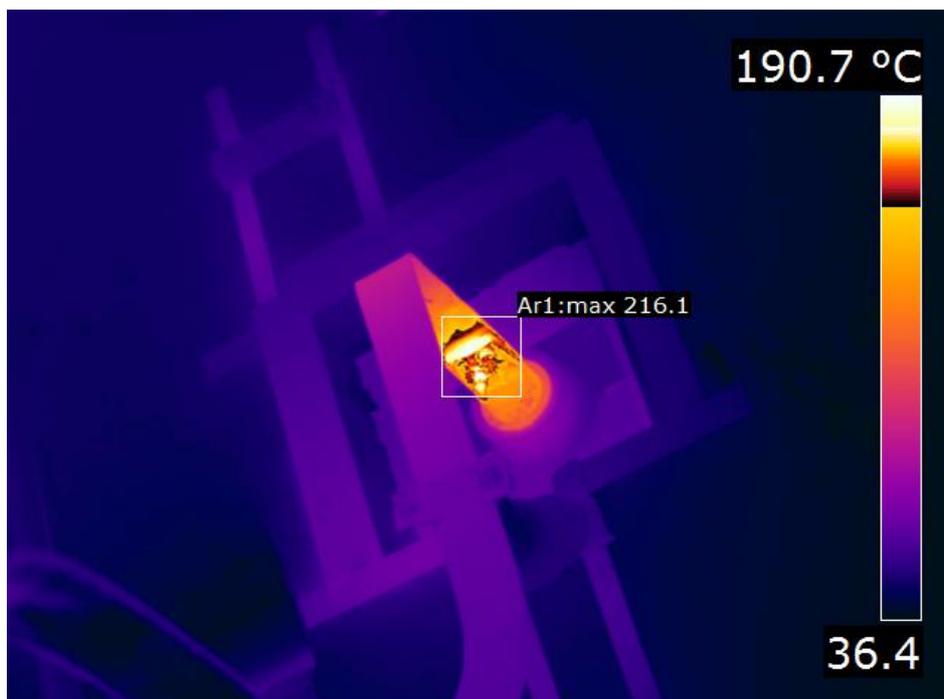


Рис. 4. Термограмма реактора РБА-3.

Таблица 3

Полученные расчетные значения для шин реактора напряжением 10 кВ

Энергия, Вт	Активный ток I_a , А	Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$, %	Установившееся напряжение, кВ
530,1	5,148	1,716	10,296
1088,1	9,522	1,904	11,424
2238,5	19,32	1,932	11,592

Основная часть. На основании измерения величины $\text{tg} \delta$ для обмоток реакторов напряжением до 10 кВ, а также в соответствии с ГОСТ 32107-2013, согласно которому максимально допустимое отклонение напряжения от номинального не должно превышать 10 %, запишем следующий алгоритм действий:

$0 \leq \text{tg} \delta \leq 1,0$ % – начальный дефект, продолжать измерения.

$1,0 \leq \text{tg} \delta \leq 1,7$ % – развившийся дефект, устранить в течение 1 квартала.

$\text{tg} \delta > 1,7$ % – сильно развитый дефект, устранить замечание в течение 1 месяца.

Если провести анализ величины $\text{tg} \delta$ для реакторов напряжением 10 кВ, то можно установить параметр коэффициента нелинейности K_U для номинального напряжения трансформатора [15]:

$$K_U = \frac{U_{уст}}{U_{нн}} = \frac{1,7U_{\phi}}{U_{нн}} = \frac{1,7 \cdot 6}{10,5} = 0,97, \quad (7)$$

где $U_{нн}$ – напряжение понижающей обмотки трансформатора, кВ, $U_{уст}$ – установившееся напряжение, кВ.

В системе электроснабжения реактор компенсирует влияние токов короткого замыкания на силовой трансформатор [16, 17]. При расчете надежности системы электроснабжения, когда на главной понизительной подстанции работают два трансформатора, с учетом долей экономических ущербов от отказа реактора воспользуемся следующей методикой, приведенной в [18]:

Величина недоотпущенной электроэнергии в электроустановках равна:

$$W_{пэ} = S_p K_{oz} \Delta t_p, \quad (8)$$

где $S_p = 17300 \dots 26000$ – мощность реактора, кВА, K_{oz} – коэффициент загрузки электроприемников; Δt_p – продолжительность отключений реактора.

Величина ущерба электроприемникам от отказа реактора равна:

$$Y = W_{пэ} \cdot y_0, \quad (9)$$

где $y_0 = 18,3$ руб/(кВт·ч) – величина ущерба при перерыве работы электроприемников.

Данные, полученные в результате расчетов, сведем в табл. 4.

Таблица 4

Расчетные значения величин недоотпущенной электроэнергии и ущерба приемникам

Тип электроустановки	Величина недоотпущенной электроэнергии, кВт·ч	Величина ущерба приемникам, руб.
Напряжением до 1 кВ	1686,96	30871
Напряжением 10 кВ реактор РБА-1	519	9497,5
Напряжением 10 кВ реактор РБА-2	812,5	14869
Напряжением 10 кВ реактор РБА-3	1625	29737,5

Заключение. Тепловизионный контроль реакторов обладает большой эффективностью при определении технических неисправностей, влияющих на функционирование систем электропитания главных понизительных подстанций. Он позволяет оценить величину диэлектрических потерь от действующего значения силы тока, а также рассчитать необходимый уровень напряжения для эффективного функционирования потребителей, который зависит от величины коэффициента нелинейности. При этом необходимо также оценить величину экономического ущерба от потери питания приемников электрической энергии, поскольку от этого сильно зависит техническое состояние наиболее ответственных узлов электрооборудования, в частности силовых трансформаторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шпиганович А.Н., Провоторова В.Н. Определение уровней напряжения системы электроснабжения с учетом влияния негативных факторов // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2009. № 1. С. 17–25.
2. Шилов И.Г. Оценка параметров надежности электроснабжения от отказов выключателя при провалах напряжения // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2008. № 3. С. 31–34.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: 6-е изд. М.: «Энергосервис», 2003. 168 с.
4. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования/ под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана и др. М.: НЦ «ЭНАС», 1998. 280 с.
5. C. Bengtsson, Z. Gajic, M. Khorami. Dynamic compensation of reactive power by variable shunt reactors: control strategies and algorithms. Paper C1-303, CIGRE 2012.
6. Мамонтов А.Н., Рычков А.В., Астанин С.С. Тепловизионный контроль трансформаторов тока и трансформаторов напряжения // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 4. С. 9–18.
7. Шпиганович А.Н., Захаров К.Д.. Внутризаводское электроснабжение. Липецк: ЛГТУ, 2007. 741 с.
8. Буев П.В. Безотказность релейной защиты как критерий эффективности процессов электропитания // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2010. № 1. С. 24–26.
9. Волков М.С., Гусев Ю.П. Оценка влияния характеристик токоограничивающего реактора на переходные восстанавливающиеся напряжения на контактах высоковольтного выключателя при отключении токов короткого замыкания // Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 7. С. 329–336.
10. Любарский Д.Р., Рубцов А.А. Ограниченные переходные восстанавливающиеся напряжения при использовании токоограничивающих реакторов в сетях 110–220 кВ // Электрические станции. 2017. № 2. С. 42–45.
11. Родштейн Л.А. Электрические аппараты: Учебник для техникумов – 3-е изд. // Ленинград: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1981. 540 с.
12. Shoup D., Paserba J., Colclaser R.G., Rosenberger Jr. T., Ganatra L., Isaac C. Transient Recovery Voltage Requirements Associated With the Application of Current-Limiting Series Reactors // Electric Power Systems Research. 2007. Vol. 77. Iss. 11. Pp. 1466–1474.
13. Santos, D., Cabriel G. Transient recovery voltages when clearing a fault in presence of series limitation reactors [Electronic resource] // International Conference on Power Systems Transients. (http://www.ipst.org/techpapers/1999/IPST99_Paper_089.pdf, accessed 01.06.2013).
14. Eilert Bjerkan. High frequency modeling of power transformers, stresses and diagnostics // Eilert Bjerkan, Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Power Eng., Norwegian Univ. Sci. Technol., Trondheim, Norway, 2005.
15. Мамонтов А.Н., Зацепина В.И., Шилов И.Г. К вопросу минимизации провалов напряжения на основе компенсации реактивной мощности // Мат. V-й Всероссийской научно-практической конференции «Системы управления электротехническими объектами», посвященной 80-летию ТулГУ. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 14–16.
16. Khrennikov A.Yu. New intellectual networks (Smart Grid) for detecting electrical equipment faults, defects and weaknesses // Smart Grid and Renewable Energy. 2012. Vol. 3. No 3.

17. Khrennikov A.Yu. Monitoring information-measuring system for detecting power transformers faults, FRA and LVI-testing diagnostics experience: Reports of Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2012), Shanghai, China, March 2012.

18. Мамонтов А.Н. О построении систем электроснабжения с учетом долей экономических ущербов от искажений напряжения // Сборник докладов IV Международной научной конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии». Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2010. С. 36–38.

Информация об авторах

Мамонтов Антон Николаевич, кандидат технических наук, инженер лаборатории. E-mail: mamontov.anton2015@mail.ru. Публичное акционерное общество «Новолипецкий металлургический комбинат». Россия, 398070, Липецк, ул. Политехническая, д. 1.

Пушница Константин Александрович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: kostpa@mail.ru. Липецкий государственный технический университет. Россия, 398046, Липецк, ул. Смургиса, д. 5.

Поступила в июне 2019 г.

© Мамонтов А.Н., Пушница К.А., 2019

^{1,*}Mamontov A.N., ¹Puschnitsa K.A.

¹Public joint-stock company "Novolipetsk Iron and Steel Works"

Russia, 398070, Lipetsk, st. Polytechnical, 1

²Lipetsk State Technical University

Russia, 398046, Lipetsk, st. Smurgis, 5

*E-mail: mamontov.anton 2015@mail.ru

THERMAL CONTROL OF REACTORS

Abstract. The article lists the types of reactors: current limiting reactors, smoothing reactor and arc suppression reactor. The principles of electrical energy conversion and methods of compensation of the electric current are described. In addition, the frequency of inspections is established including unplanned, current and capital repairs of equipment. The list is formed of the examined units, as well as the features of thermal imaging diagnostics of reactors with voltages up to and above 1000 V, including the design of a smoothed reactor with a voltage of 780 V and concrete reactor of voltage 10 kV. The thermograms of defects of contact connections are presented. The calculation of the angle dielectric loss tangent $\tan \delta$ and the steady-state voltage is performed. As a result of the analysis of thermograms, the cause of defects in current limiting reactors with a voltage of 10 kV is formed. On the basis of the calculated value of $\tan \delta$, the method of reactor inspection is made; the calculation of the permissible voltage deviation based on the calculated nonlinearity coefficient is carried out. The calculation of the economic damage from the reactor failure depending on the value of the total power, current load and duration of shutdown, as well as the conclusion about the effectiveness of this type of diagnostics are made.

Keywords: thermal control, current repair, current limiting reactor, dielectric loss, nonlinearity coefficient.

REFERENCES

1. Shpiganovich A.N., Provotorova V. N. Determination of voltage levels of supply system taking into account the influence of negative factors [Opredeleniye urovnej napryazheniya sistemy elektrosnabzheniya s uchetom vliyaniya negativnykh faktorov]. News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region. 2009. No. 1. Pp. 17–25. (rus)

2. Shilov I.G. Evaluation of reliability parameters of electrosupply from switch failures at voltage dips [Otsenka parametrov nadezhnosti elektrosnabzheniya ot otkazov vykliuchatelya pri provalakh napryazheniya]. News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region. 2008. No. 3. Pp. 31–34. (rus)

3. User rules for operating electrical equipment 6-ed. [Pravila tekhnicheskoy ecspluatatsii electroustanovok potrebitelej 6-e izd.] Moscow: «Energoservice», 2003. 168 p. (rus)

4. RD 34.45-51.300-97. Scope and standards of testing of electrical equipment [RD 34.45-51.300-97 Ob'yem i normy ispytaniy electrooborudovaniya] under total. ed. B.A. Alekseeva, F.L. Kogana i dr. Moscow: NTs «ENAS», 1998. 280 p. (rus)

5. Bengtsson C., Gajic Z., Khorami M. Dynamic compensation of reactive power by variable shunt reactors: control strategies and algorithms. Paper C1-303, CIGRE 2012.

6. Mamontov A.N., Rychkov A.V., Astanin S.S. Thermal control of current transformers and voltage transformers [Teplovizionnyj control' transformatorov toka i transformatorov napryazheniya]. News of

Higher Educational Institutions of the Chernozem Region. 2016. No. 4. Pp. 9–18. (rus)

7. Shpiganovich A.N., Zakharov K.D. In-plant power supply [Vnutrizavodskoe elektrosnabzheniye]. Lipetsk: LSTU, 2007. 741 p. (rus)

8. Buev P.V. Reliability of relay protection how the criterion of the efficiency of the power supply [Bezotkaznost' releynoj zaschity kak kriterij effektivnosti processov elektrosnabzheniya]. News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region. 2010. No. 1. Pp. 24–26. (rus)

9. Volkov M.S., Gusev Y.P. Assessment of the influence of characteristics current limiting reactors on the transition recoverable stresses on contact of high-voltage circuit breaker when you disconnect of short circuit current [Otsenka vliyaniya kharakteristicheskogo tokoogranichivayuschego reaktora na perekhodnye vosstanavlivayuschiesya napryazheniya na kontaktakh vysokovol'tnogo vyklyuchatelya pri otklyuchenii tokov korotkogo замыкания]. Science and education: Scientific publication MSTU Bauman's name 2013. No. 7. Pp. 329–336. (rus)

10. Lyubarskiy D.R., Rubtsov A.A. The restriction of the transition recoverable stresses when using current limiting reactors into the network 110–220 kV [Ogranichenie perekhodnykh vosstanavlivayuschikh napryazhenij pri ispol'zovanii tokoogranichivayuschikh reaktorov v setyakh 110–220 kV]. Electric station. 2017. No. 2. Pp. 42–45. (rus)

11. Rodshtein L.A. Electrical apparatus: Education for technical schools [Elektricheskie apparaty: Uchebnik dlya tekhnikumov – 3-e izd.]. Leningrad: Energoizdat, Leningrad branch, 1981. 540 p. (rus)

12. Shoup D., Paserba J., Colclaser R.G., Rosenberger Jr T., Ganatra L., Isaac C. Transient Recovery Voltage Requirements Associated With the Application of Current-Limiting Series Reactors. Electric Power Systems Research. 2007. Vol. 77. Iss. 11. Pp. 1466–1474.

13. Santos D., Cabriel G. Transient recovery voltages when clearing a fault in presence of series limitation reactors. International Conference on Power Systems Transients. -- (http://www.ipst.org/techpapers/1999/IPST99_Paper_089.pdf, accessed 01.06.2013).

14. Eilert Bjerkan. High frequency modeling of power transformers, stresses and diagnostics. Eilert Bjerkan, Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Power Eng., Norwegian Univ. Sci. Technol., Trondheim, Norway, 2005.

15. Mamontov A.N., Zatssepina V.I., Shilov I.G. To the question of minimizing voltage drips based on reactive power compensation [K voprosu minimizatsii provalov napryazheniya na osnove kompensatsii reaktivnoj moschnosti]. Mat. V-y All-Russian scientific and practical conference «Control systems of electric power facilities», dedicated to the eightieth anniversary TuSU – Tula: TuSU, 2010. Pp. 14–16. (rus)

16. Khrennikov A.Yu. New intellectual networks (Smart Grid) for detecting electrical equipment faults, defects and weaknesses. Smart Grid and Renewable Energy. 2012. Vol. 3. No 3.

17. Khrennikov A.Yu. Monitoring information-measuring system for detecting power transformers faults, FRA and LVI-testing diagnostics experience: Reports of Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2012), Shanghai, China, March 2012.

18. Mamontov A.N. About construction of power supply systems taking into account the share of economic losses from voltage drips [O postroenii system elektrosnabzheniya s uchetom dolej ekonomicheskikh uscherbov ot iskazhenij napryazheniya]. Collection of reports IV International practical conference «Energy and energy efficient technologies». Lipetsk: LSTU, 2010. Pp. 36–38. (rus)

Information about the authors

Mamontov, Anton N. PhD, Engineer of the laboratory. E-mail: mamontov.anton2015@mail.ru. Public joint-stock company “Novolipetsk Iron and Steel Works”. Russia, 398070, Lipetsk, st. Polytechnical, 1.

Puschnitsa, Konstantin A. PhD. E-mail: kostpa@mail.ru. Lipetsk State Technical University. Russia, 398046, Lipetsk, st. Smurgis, 5.

Received in June 2019

Для цитирования:

Мамонтов А.Н., Пушница К.А. Тепловизионный контроль реакторов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 8. С. 145–151. DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500

For citation:

Mamontov A.N., Puschnitsa K.A. Thermal control of reactors. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 8. Pp. 145–151. DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500