УДК 621.31
DOI: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.555-563

ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ КОНДЕНСАТОРОВ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗАГРАДИТЕЛЕЙ

А. Н. Шпиганович[1], А. Н. Мамонтов[2], А. В. Бойчевский[1]

Кафедра электрооборудования,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (1);
Лаборатория электроизмерительных приборов
и диагностики электрооборудования, mamontov.anton2015@mail.ru;
ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (2), г. Липецк, Россия

Ключевые слова: высокочастотный заградитель; диэлектрические потери; конденсатор; переходный процесс; тепловизионный контроль.

Аннотация: Рассмотрены особенности протекания нарушений в электрической сети высокого напряжения, а также проведения тепловизионного контроля конденсаторов и высокочастотных заградителей; число контролируемых точек данного электрооборудования; диагностика конденсаторов напряжением 35 кВ установки «печь-ковш» конвертерных цехов с описанием переходного процесса при возникновении дефекта, элементов батарей, а также особенности конструкции конденсаторов и высокочастотных заградителей напряжением 110…220 кВ. Проведены расчеты тангенса угла диэлектрических потерь tgδ, величин активного тока и установившегося напряжения. Полученные результаты сведены в таблицу. На основании расчетов сформирована методика тепловизионного контроля с рассматриваемыми сроками устранения данных дефектов. Сделан вывод о необходимости контроля элементов системы электроснабжения.

Введение

В электрической сети высокого напряжения (110 кВ и выше) возникают внутренние перенапряжения [1] в результате как нормальных (включение и отключение линии электропередачи, отключение трансформаторов и реакторов без нагрузки), так и послеаварийных [2]. Одну из ведущих ролей в данном процессе занимают батареи конденсаторов и высокочастотные (**ВЧ**) заградители.

Согласно приложению 3 РД 34.45-51.300-97 [3] тепловизионный контроль конденсаторов осуществляется следующим образом: а) диагностика контактных соединений; б) контроль и оценка состояния элементов батарей силовых конденсаторов; в) проверка элементов конденсаторов связи и делительных конденсаторов.

Высокочастотные заградители монтируются на гирляндах изоляторов к порталам подстанций с напряжением 110 кВ и выше. При высоких ветровых нагрузках, а также при контактных соединениях шлейфов большой длины возникают нагревы болтовых контактных соединений [4]. В соответствии с ГОСТ 8024–90 [5] оценивается превышение температуры, а также проводится оценка по избыточной температуре перегрева контактов [6].

Теория вопроса

В электроустановках напряжением 110 кВ и выше конденсаторы связи обычно располагаются на фазе «С» вводов с ВЛ-110 кВ с целью компенсации грозовых и коммутационных перенапряжений [7, 8]. Но кроме них, также существу-

ют силовые конденсаторы, представляющие собой RC-цепочки, для компенсации перенапряжений в электроустановках агрегата «печь-ковш» конвертерных цехов [9 – 11].

При этом описание переходного процесса в конденсаторе имеет вид [12]

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

где R – активное сопротивление, Ом; ω – частота тока, ω = 314 Гц; C – емкость конденсатора, Ф; tgδ – тангенс угла диэлектрических потерь; L – индуктивность, Гн.

В результате возникновения дефекта в конденсаторе выражение принимает вид

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

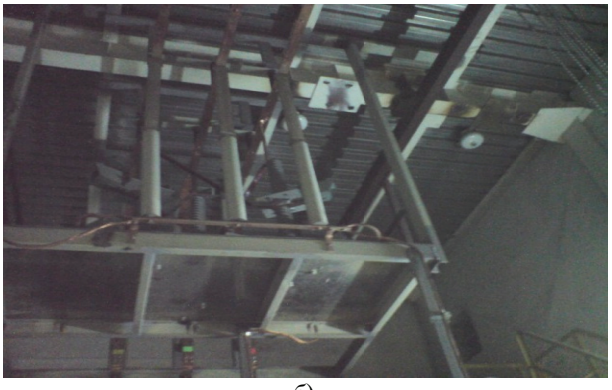
Методика расчета

В электроустановке трансформатора установки «печь-ковш» зафиксирован локальный нагрев конденсатора. Термограмма и фото представлены на рис. 1. Проведем расчет tgδ на основании данного дефекта. Энергия, выделяющаяся на поверхности конденсатора, равна [13]

$$E = \varepsilon\sigma s T^4 = 0{,}94 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot (273 + (47{,}2 - 32{,}9))^4 = 1815{,}6 \text{ Вт}, \quad (3)$$

где ε – коэффициент излучения; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м^2·К^4), σ = 5,67 · 10^{-8}; s – площадь тока утечки, s = 5 м^2; T – излучаемая температура, К.

а)



б)

Рис. 1. Термограмма (*а*) и фото (*б*) конденсаторов напряжением 35 кВ трансформатора установки «печь-ковш»

Активная составляющая тока I_a находится по формуле [14]

$$I_a = \left(\frac{E\, I_{раб}}{U_ф} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где $U_ф$ – фазное напряжение, В; $I_{раб}$ – рабочий ток, А.

Величина тангенса угла диэлектрических потерь составляет [14]

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{I_a}{I_р} = \frac{I_a}{I_{раб}}, \quad (5)$$

где $I_р$ – реактивный ток, А.

В результате установившееся напряжение определяется как [14]

$$U_y = U_ф \mathrm{tg}\delta. \quad (6)$$

Далее рассмотрим только конденсаторы связи напряжением 110 кВ. Конденсаторы данного типа состоят из фарфоровой покрышки, в которой располагаются три параллельно соединенных пакета, в каждом из которых по 90 секций рулонного типа, соединенных последовательно. Секции в пакетах затянуты между металлическими плитами с помощью изоляционных планок. Для компенсации теплового расширения масла в нижней части конденсатора расположен расширитель в виде сильфона, внутренняя часть которого соединена через отверстие во фланце с атмосферой. Пространство между корпусом и пакетами секций заполнено конденсаторным маслом [15, 16].

Во время проведения тепловизионного контроля на главной понизительной подстанции зафиксирован дефект конденсатора. Термограмма изображена на рис. 2.

Полученные данные запишем в табл. 1.

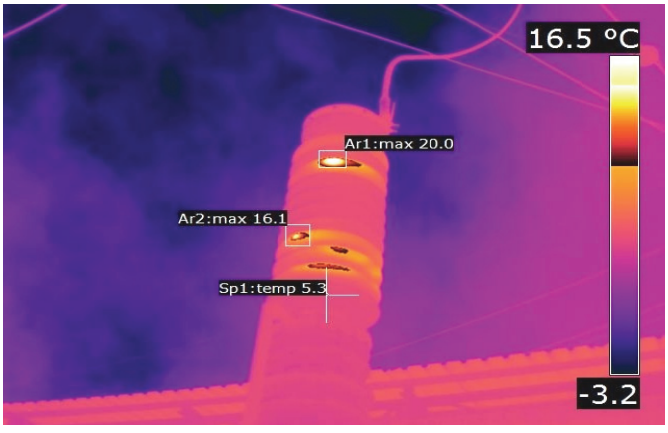


Рис. 2. Термограмма конденсатора связи воздушной линии электропередачи напряжением 110 кВ

Таблица 1

Расчетные значения для конденсатора напряжением 35…110 кВ

Номинальное напряжение, кВ	Активный ток I_a, А	Тангенс угла диэлектрических потерь tg δ, %	Установившееся напряжение, кВ
35	5,219	1,74	34,8
110	2,262	1,13	73,45

Выполненные измерения tgδ для конденсаторов напряжением 35 кВ и конденсаторов связи напряжением 110 кВ позволили предложить следующую методику измерений:

а) $0 \le \text{tg}\delta \le 0{,}4$ % – начальный дефект, продолжать измерения;

б) $0{,}4 \le \text{tg}\delta \le 1{,}0$ % – развившийся дефект, устранить в течение одного квартала;

в) $\text{tg}\delta > 1{,}0$ % – сильно развитый дефект, устранить замечание в течение одного месяца.

Высокочастотный заградитель используется в электроустановках напряжением 110 кВ и выше в качестве шунтирующего резистора при нагреве контактных соединений. При этом наблюдается отклонение частоты от номинальной, которое в основном носит емкостной характер. В результате в электрической сети происходят провалы напряжений.

В общем виде выражение для расписания переходного процесса выглядит следующим образом [17]:

$$-j\omega L + R = j\omega C. \tag{7}$$

Если возникает дефект в заградителе, то выражение (7) принимает вид

$$-(j\omega L_1 + j\omega L_2) + R_1 + R_2 = j\omega C\text{tg}\delta, \tag{8}$$

где L_1, L_2 – величины индуктивности болтовых контактных соединений заградителя, Гн; R_1, R_2 – величины активных сопротивлений между соединениями заградителя, Ом.

Рассмотрим несколько примеров. При проведении тепловизионного контроля на подстанциях напряжением 110…220 кВ [18] зафиксирован нагрев контактов. Термограммы изображены на рис. 3.

а)

б)

Рис. 3. Термограмма высокочастотного заградителя напряжением, кВ:
а – 110; *б* – 220

Таблица 2

Расчетные значения для ВЧ-заградителя напряжением 110…220 кВ

Энергия, Вт	Активный ток I_a, А	Тангенс угла диэлектрических потерь tgδ, %
865,7	1,088	0,68
492,2	0,485	0,46

Аналогично рассмотренным температурам нагрева конденсаторов, согласно формулам (3) – (6), выполняем расчет. Полученные результаты расчетов сведены в табл. 2.

Если провести оценку нагрева контактных соединений ВЧ-заградителей, то получается, что данные дефекты являются развивающимися, поскольку величина tgδ < 0,9.

Измерения tgδ для ВЧ-заградителей напряжением 110 кВ позволили, как и в первом рассмотренном случае, поступить следующим образом:

а) 0≤ tgδ ≤ 0,4 % – начальный дефект, продолжать измерения;

б) 0,4 ≤ tgδ ≤ 0,9 % – развившийся дефект, устранить в течение одного квартала;

в) tgδ > 0,9 % – сильно развитый дефект, устранить замечание в течение одного месяца.

На основании измерения tgδ для ВЧ-заградителей напряжением 220 кВ сформулируем предлагаемый подход измерений:

а) 0≤ tgδ ≤ 0,15 % – начальный дефект, продолжать измерения;

б) 0,15 ≤ tgδ ≤ 0,45 % – развившийся дефект, устранить в течение одного квартала;

в) tgδ > 0,45 % – сильно развитый дефект, устранить замечание в течение одного месяца.

Заключение

Тепловизионный контроль конденсаторов и высокочастотных заградителей необходим для эффективного и надежного обеспечения питания потребителей, а также для обеспечения безотказной работы потребителей напряжением 35…220 кВ, поскольку при возникновении дефектов данного оборудования в системе электроснабжения в электрической сети будут наблюдаться повышенные пульсации высших гармонических составляющих тока, что приведет к значительным нарушениям питания потребителей непрерывных производств, а также возникновению инцидентов, приводящих к остановке питания сложного технологического процесса. Результаты исследования следует применять к потребителям напряжением 110 кВ для осуществления незамедлительных ремонтных мероприятий, замены элементов системы электроснабжения, отработавших нормативный срок эксплуатации.

Список литературы

1. Шпиганович, А. Н. Внутризаводское электроснабжение и режимы / А. Н. Шпиганович, К. Д. Захаров. – Липецк : ЛГТУ, 2007. – 742 с.

2. Шпиганович, А. Н. Нормализация переходных процессов и компенсация возмущающих факторов в системе электроснабжения : монография / А. Н. Шпиганович, В. И. Зацепина, Е. П. Зацепин. – Елец : МУП «Типография» г. Ельца, 2011. – 165 с.

3. Объем и нормы испытаний электрооборудования : РД 34.45-51.300-97 / Под общ. ред. Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана [и др.]. – М. : НЦ «ЭНАС», 1998. – 280 с.

4. Микуцкий, Г. В. Высокочастотные заградители и устройства присоединения для каналов высокочастотной связи / Г. В. Микуцкий. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 190 с.

5. ГОСТ 8024–90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. – Взамен ГОСТ 8024–84 ; введ. 1991-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 19 с.

6. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ : РД 153-34.0-20.363-99 / Под общ. ред. С. А. Бажанова, А. В. Кузьмина, М. А. Вихрова. – М. : РАО «ЕЭС» России, 2000. – 200 с.

7. Зализный, Д. И. Методика диагностирования силовых конденсаторов на аномальный нагрев / Д. И. Зализный // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 563 – 572. doi: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-563-572

8. Невретдинов, Ю. М. Исследование высокочастотных перенапряжений и способов их ограничения / Ю. М. Невретдинов, Г. П. Фастий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та. – 2010. – № 1 (95). – С. 244 – 250.

9. Горбунов, К. В. О тепловизионном контроле электрооборудования / К. В. Горбунов, Ю. С. Попрыкин, А. В. Соловьев // Энергетик. – 2002. – № 2. – 2 с.

10. Уразалиев, И. Б. Тепловизионная диагностика конденсаторов связи 110 кВ / И. Б. Уразалиев / Энергетик. – 2015. – № 12. – С. 42 – 45.

11. Коваленко, Д. В. Неисправности батарей статических конденсаторов, возникающие при наличии высших гармоник в системе электроснабжения / Д. В. Коваленко // Молодой ученый. – 2016. – № 19 (123). – С. 69 – 72.

12. Мамонтов, А. Н. Тепловизионный контроль трансформаторов тока и трансформаторов напряжения / А. Н. Мамонтов, А. В. Рычков, С. С. Астанин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2016. – № 4 (46). – С. 9 – 18.

13. Грачев, А. С. Количественные показатели надежности невосстанавливаемых элементов кабельной линии 10 кВ / А. С. Грачев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2010. – № 7. – С. 52 – 55.

14. Николаев, П. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена российского производства / П. Николаев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2010. – № 5. – С. 20 – 22.

15. Spring Search Algorithm for Simultaneous Placement of Distributed Generation and Capacitors / M. Dehghani, M. Mardaneh, Z. Montazeri [et al.] // Електротехніка і Електромеханіка. – 2018. – No. 6. – P. 68 – 73. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.10

16. Баранов, М. И. Приближенный расчет активного сопротивления и температуры канала импульсной электрической дуги в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного емкостного накопителя энергии / М. И. Баранов, С. В. Рудаков // Електротехніка і Електромеханіка. – 2017. – № 4. – С. 42 – 48. doi: 10.20998/2074-272X.2017.4.07

17. Мамонтов, А. Н. Тепловизионный контроль воздушных линий электропередач / А. Н. Мамонтов, С. С. Астанин, А. В. Рычков // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – № 1 (47). – С. 9 – 16.

18. Поляков, В. М. Тепловизионная диагностика высоковольтного оборудования энергосистем и энергопредприятий / В. М. Поляков, Л. М. Петров // Новости электротехники. – 2001. – № 5 (11). – С. 4 – 7.

Thermal Control of Capacitors and High Frequency Restrainers

A. N. Shpiganovich[1], A. N. Mamontov[2], A. V. Boychevsky[1]

Department of Electrical Equipment, Lipetsk State Technical University (1);
Laboratory of Electrical Measuring Instruments and Diagnostics
of Electrical Equipment, PJSC Novolipetsk Metallurgical Plant (2),
mamontov.anton2015@mail.ru, Lipetsk, Russia

Keywords: high-frequency minelayer; dielectric losses; capacitor; transient process; thermal imaging control.

Abstract: The article considers the features of the occurrence of violations in the high-voltage electrical network, as well as the thermal imaging control of capacitors and high-frequency traps, the number of monitored points of this electrical equipment, the diagnostics of 35 kV capacitors of the "ladle furnace" installation of converter shops with a description of the transient process in the event of a defect, battery elements, as well as design features of capacitors and high-frequency traps with voltage 110...220 kV, the tangent of dielectric loss angle tgδ, the values of active current and steady-state voltage were calculated, the results are summarized in the table. Based on the calculations, a method of thermal imaging control was formed with the considered terms for eliminating these defects; a conclusion about the need to control the elements of the power supply system was made.

References

1. Shpiganovich A.N., Zakharov K.D. *Vnutrizavodskoye elektrosnabzheniye i rezhimy* [Intrafactory power supply and modes], Lipetsk: LGTU, 2007, 742 p. (In Russ.)

2. Shpiganovich A.N., Zatsepina V.I., Zatsepin Ye.P. *Normalizatsiya perekhodnykh protsessov i kompensatsiya vozmushchayushchikh faktorov v sisteme elektrosnabzheniya: monografiya* [Normalization of transient processes and compensation of disturbing factors in the power supply system: monograph], Yelets: MUP «Tipografiya» Yel'tsa, 2011, 165 p. (In Russ.)

3. Alekseyev B.A., Kogan F.L. [Eds.] *Ob"yem i normy ispytaniy elektrooborudovaniya: RD 34.45-51.300-97* [Scope and standards of electrical equipment tests: RD 34.45-51.300-97], Moscow: NTS «ENAS», 1998, 280 p. (In Russ.)

4. Mikutskiy G.V. *Vysokochastotnyye zagraditeli i ustroystva prisoyedineniya dlya kanalov vysokochastotnoy svyazi* [High-frequency minelayers and connection devices for high-frequency communication channels], Moscow: Energoatomizdat, 1984, 190 p. (In Russ.)

5. *GOST 8024–90. Apparaty i elektrotekhnicheskiye ustroystva peremennogo toka na napryazheniye svyshe 1000 V. Normy nagreva pri prodolzhitel'nom rezhime raboty i metody ispytaniy* [GOST 8024–90. Alternating current apparatus and devices for voltages above 1000 V. Temperature rise at continuous duty. Norms and test methods], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1990, 19 p. (In Russ.)

6. Bazhanov S.A., Kuz'min A.V., Vikhrov M.A. [Eds.] *Osnovnyye polozheniya metodiki infrakrasnoy diagnostiki elektrooborudovaniya i VL: RD 153-34.0-20.363-99* [The main provisions of the method of infrared diagnostics of electrical equipment and overhead lines: RD 153-34.0-20.363-99], Moscow: RAO «YEES» Rossii, 2000, 200 p. (In Russ.)

7. Zaliznyy D.I. [Diagnostic technique of power capacitors for abnormal heating], *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"yedineniy SNG* [Energetika. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2016, vol. 59, no. 6, pp. 563-572, doi: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-563-572 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Nevretdinov Yu.M., Fastiy G.P. [Research of high-frequency overvoltages and ways to limit them], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Scientific and technical bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University], 2010, no. 1 (95), pp. 244-250. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Gorbunov K.V., Poprykin Yu.S., Solov'yev A.V. [About thermal imaging control of electrical equipment], *Energetik* [Energetic], 2002, no. 2, 2 p. (In Russ.)

10. Urazaliyev I.B. [Thermal imaging diagnostics of 110 kV coupling capacitors], *Energetik* [Energetic], 2015, no. 12, pp. 42-45. (In Russ.)

11. Kovalenko D.V. [Malfunctions of static capacitor banks arising in the presence of higher harmonics in the power supply system], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2016, no. 19 (123), pp. 69-72. (In Russ.)

12. Mamontov A.N., Rychkov A.V., Astanin S.S. [Thermal imaging control of current transformers and voltage transformers], *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya* [News of higher educational institutions of the Chernozem region], 2016, no. 4 (46), pp. 9-18. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Grachev A.S. [Quantitative indicators of the reliability of non-recoverable elements of the 10 kV cable line], *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: operation and repair], 2010, no. 7, pp. 52-55. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Nikolayev P. [Cables with cross-linked polyethylene insulation of Russian production], *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: operation and repair], 2010, no. 5, pp. 20-22. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Dehghani M., Mardaneh M., Montazeri Z., Ehsanifar A., Ebadi M.J., Grechko O.M. Spring Search Algorithm for Simultaneous Placement of Distributed Generation and Capacitors, *Yelektrotekhnika i Yelektromekhanika* [Electrical engineering and electromechanics], 2018, no. 6, pp. 68-73, doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.10

16. Baranov M.I., Rudakov S.V. [Approximate calculation of the active resistance and temperature of the channel of a pulsed electric arc in a high-current discharge circuit of a powerful high-voltage capacitive energy storage], *Yelektrotekhnika i Yelektromekhanika* [Electrical engineering and electromechanics], 2017, no. 4, pp. 42-48, doi: 10.20998/2074-272X.2017.4.07 (In Russ., abstract in Eng.)

17. Mamontov A.N., Astanin S.S., Rychkov A.V. [Thermal imaging control of overhead power lines], *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya* [News of higher educational institutions of the Chernozem region], 2017, no. 1 (47), pp. 9-16. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Polyakov V.M., Petrov L.M. [Thermal imaging diagnostics of high-voltage equipment of power systems and energy enterprises], *Novosti elektrotekhniki* [News of electrical engineering], 2001, no. 5 (11), pp. 4-7. (In Russ.)

Wärmebildüberwachung der Kondensatoren und Hochfrequenzsperren

Zusammenfassung: Der Artikel betrachtet die Merkmale des Auftretens von Verstößen im Hochspannungsnetz, sowie die Wärmebildsteuerung von Kondensatoren und Hochfrequenzsperren, die Anzahl der gesteuerten Punkte dieser elektrischen

Ausrüstung, die Diagnose von 35-kV-Kondensatoren der "Pfannenofen"-Installation von Konverter-Werkhallen mit einer Beschreibung des Übergangsprozesses im Falle eines Defekts der Batteriezellen, sowie Konstruktionsmerkmale von Kondensatoren und Hochfrequenzsperren mit der Spannung von 110...220 kV. Es ist die Berechnung des Tangens des dielektrischen Verlusts tgδ, der Werte des Wirkstroms und der stationären Spannung durchgeführt, die erhaltenen Ergebnisse sind in der Tabelle zusammengefasst. Basierend auf den Berechnungen ist ein Verfahren zur Steuerung der Wärmebildkontrolle mit den berücksichtigten Begriffen zur Beseitigung dieser Defekte gebildet, und es ist eine Schlussfolgerung über die Notwendigkeit gezogen, die Elemente des Stromversorgungssystems zu überwachen.

Contrôle thermovisuel des condensateurs et des supresseurs à haute fréquence

Résumé: Sont considérées les particularités des erreurs dans le réseau électrique à haute tension, ainsi que le contrôle thermovisuel des condensateurs et des suppresseurs à haute fréquence, le nombre des points contrôlés de cet équipement électrique, le diagnostic des condensateurs à une tension de 35 kv dans une installation «four-panier» des ateliers avec la description du processus de la transition en cas de défaut, les éléments des batteries, ainsi que les caractéristiques de la conception des condensateurs à haute fréquence et des supresseur d'une tension de 110...220 kv; est effectué le calcul de la tangente de l'angle de pertes diélectriques tgδ, des valeurs du courant actif et de la tension constant; les résultats obtenus sont résumés dans un tableau. A la base des calculs, est formée une technique de contrôle thermovisuel avec les délais d'élimination de ces défauts; est conclu qu'il est nécessaire de contrôler les éléments du système d'alimentation électrique.

Авторы: ***Шпиганович Александр Николаевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия; ***Мамонтов Антон Николаевич*** – кандидат технических наук, инженер лаборатории электроизмерительных приборов и диагностики, ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»; ***Бойчевский Александр Валерьевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия.

Рецензент: ***Калинин Вячеслав Федорович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.