

6. Ankhimuk, V. L., Opeyko, & Mikheev, N. N. (2000) *Automatic Control Theory*. Minsk, Design PRO. 352 p. (in Russian).
7. Shreiner, R. T. (2000) *Mathematical Modeling of Alternative Current Drives with Semiconductor Frequency Converter*. Yekaterinburg, URO RAN. 654 p. (in Russian).
8. Trzynadlowski, A. M. (2001) *Control of Induction Motors*. London, Academic Press, etc. 228 p.
9. Boldea, I., & Nasar, S. A. (1999) *Electric Drives*. London, New York, Washington, CRC Press, D.C. 350 p.
10. Sokolovskiy, G. G. (2007) *Alternative Current Electric Drives with Frequency Regulation*. 2nd ed. Moscow, Akademiya. 272 p. (in Russian).

Представлена кафедрой электропривода
и автоматизации промышленных установок
и технологических комплексов

Поступила 30.04.2015

УДК 621.311:017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ПОСЛЕ НОРМАТИВНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Докт. техн. наук, проф. ФУРСАНОВ М. И., асп. ПЕТРАШЕВИЧ Н. С.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: nik.petrashevich@gmail.com

Для потребительских трансформаторов распределительных сетей важнейшими параметрами, характеризующими их эффективность, являются значения потерь мощности как нагрузочных, так и холостого хода. Точное определение названных величин способствует более обоснованному выбору оптимизационных мероприятий. Данная тема актуальна, потому что в современных электрических сетях используется немало масляных трансформаторов, чей срок эксплуатации значительно превышает нормативный (25 лет), а измерение потерь мощности согласно действующим нормативам в условиях непрерывной эксплуатации не всегда возможно.

Представлена усовершенствованная методика определения потерь на основе общепринятой тепловой модели масляного трансформатора. Указаны недостатки существующей методики и обоснованы некоторые изменения в практическом применении математической модели. Сделан акцент на особенностях измерения температуры в масляном трансформаторе. Предложен прототип устройства открытой архитектуры для реализации усовершенствованного метода измерения потерь мощности. Описаны конструктивные особенности устройства, его функциональные возможности и эскизная схема установки. Отмечена возможность не только определять потери мощности, но и передавать полученную информацию диспетчеру по GSM-связи для упрощения мониторинга состояния трансформатора, а также возможность интеграции устройства с системой тепловой защиты трансформатора. Практическая значимость и область применения полученных результатов – это разработка и выбор оптимизационных мероприятий в распределительных электрических сетях (например, замена трансформатора).

Ключевые слова: масляный трансформатор, потери мощности, срок эксплуатации.

Ил. 3. Библиогр.: 10 назв.

POWER LOSSES ASSESSMENT IN TRANSFORMERS AFTER THE NORMATIVE OPERATING PERIOD

FURSANOV M. I., PETRASHEVICH N. S.

Belarusian National Technical University

The capacity losses values both loading and off-load are topmost parameters characterizing the distribution mains customers' transformers operating effectiveness. Precise determination of the specified values facilitates substantiated choice of the optimizing procedures. The actuality of the given topic increases owing to the fact that the modern electric grid utilizes plenty of the oil-transformers whose time in commission considerably exceeds the statutory 25 years. Under the conditions of continued operation the power-losses measurement according to the functioning guidelines does not seem always possible.

The authors present an improved power-losses assessment technique based on the currently accepted thermal model of the oil-transformer. They indicate the deficiency of the existing technique and substantiate some of the changes in practical application of the mathematical model. The article makes an emphasis on peculiarities of the temperature changes in the oil-transformer and offers a prototype device of open architecture for realizing the improved technique of the power-losses measurement. The paper describes the device design features and functionality options and depicts its sketchy schematic. The authors note the potential of additional to assessing the power-losses volume, transmitting the obtained information to the dispatcher via GSM-connection for simplification of the transformer status monitoring; as well as the capability of integrating the device into the system of the transformer thermal protection. The practical merit and application scope of the obtained results are in development and choice of the optimizing measures to be taken in the distributive electrical grids, e. g. the transformer replacement.

Keywords: oil-immersed transformer, power losses, operating period.

Fig. 3. Ref.: 10 titles.

Для планирования и проведения мероприятий по оптимизации электроэнергетических систем важно иметь данные о текущем состоянии элементов электрической сети. Для потребительских трансформаторов распределительных сетей важнейшими параметрами, характеризующими их эффективность, являются значения потерь мощности как нагрузочных, так и холостого хода. Точное определение названных величин способствует более обоснованному выбору оптимизационных мероприятий. Согласно принятым нормам [1], искомые потери мощности холостого хода в трансформаторе ΔP_x могут быть определены по формуле

$$\Delta P_x = \Delta P_{\text{хн}} \left(\frac{U_i}{U_{\text{вн}}} \right)^2, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{хн}}$ – потери активной мощности холостого хода по данным завода-изготовителя при включении трансформатора на номинальное напряжение обмотки высокой стороны; U_i – рабочее напряжение трансформатора в i -м режиме; $U_{\text{вн}}$ – номинальное напряжение обмотки высокого напряжения.

Известно, что нормативный срок эксплуатации масляных трансформаторов составляет 25 лет [2]. Однако в современных распределительных электрических сетях еще работают вполне исправные трансформаторы, чей срок эксплуатации значительно превышает нормативный. При этом в силу влияния необратимых процессов старения материалов использование

в расчетах паспортных параметров $\Delta P_{\text{хн}}$ для длительно эксплуатируемых трансформаторов не корректно. В ряде работ [3, 4] экспериментально установлено изменение величины $\Delta P_{\text{хн}}$ в распределительных масляных трансформаторах, срок эксплуатации которых превышает нормативный. В то же время своевременное измерение потерь мощности в порядке, установленном в [5], не всегда выполняется, особенно для трансформаторов номинальной мощностью до 1000 кВ·А, периодичность испытаний которых в [5] не указана.

В связи с вышесказанным предлагается усовершенствованный метод определения потерь мощности, разработанный авторами на основе тепловой модели трансформатора, представленной в [6, 7]. Согласно [2], превышение температуры трансформаторного масла в верхних слоях $\Delta\theta_{\text{м}}$ над температурой окружающей среды для установившегося теплового процесса определяется следующим образом:

$$\Delta\theta_{\text{м}} = \Delta\theta_{\text{мн}} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x, \quad (2)$$

где $\Delta\theta_{\text{мн}}$ – паспортное превышение температуры масла в верхних слоях при номинальной нагрузке (для распределительных трансформаторов типа ТМ $\Delta\theta_{\text{мн}} = 55$ °С); K – коэффициент загрузки трансформатора; x – показатель степени суммарных потерь (для распределительных трансформаторов типа ТМ $x = 0,8$); $R = \Delta R_{\text{к}}/\Delta R_{\text{х}}$ – отношение потерь короткого замыкания $\Delta R_{\text{к}}$ к потерям холостого хода $\Delta R_{\text{х}}$.

Из (2) получим

$$R = \frac{\left(\frac{\Delta\theta_{\text{м}}}{\Delta\theta_{\text{мн}}} \right)^{\frac{1}{x}} - 1}{K^2 - \left(\frac{\Delta\theta_{\text{м}}}{\Delta\theta_{\text{мн}}} \right)^{\frac{1}{x}}}. \quad (3)$$

Используя упрощенную модель трансформатора как однородного тела [7], тепловую постоянную времени трансформатора τ можно определить по формуле

$$\tau = \frac{mc}{P} \Delta\theta, \quad (4)$$

где m – масса трансформатора; c – удельная теплоемкость трансформатора; $P = K^2 \Delta P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{х}}$ – суммарные потери активной мощности в трансформаторе; $\Delta\theta$ – установившееся превышение температуры трансформатора над температурой окружающей среды.

Математическая модель распределения температуры масла по высоте трансформатора, принятая в [6], позволяет использовать в качестве $\Delta\theta$ превышение температуры масла в верхних слоях $\Delta\theta_{\text{м}}$. В целях упрощения, принимая, что масса и удельная теплоемкость трансформатора постоянны и не зависят от температуры и срока службы, формулу (4) можно переписать в виде

$$K^2 \Delta P_k + \Delta P_x = \frac{G}{\tau} \Delta \theta_m, \quad (5)$$

где $G = mc$ – теплоемкость трансформатора, определяемая по паспортным данным превышения температуры $\Delta \theta_{\text{MH}}$, постоянной времени τ_n и паспортным потерям холостого хода ΔP_{KH} и короткого замыкания $\Delta P_{\text{КЗ}}$,

$$G = \frac{\Delta P_{\text{KH}} + \Delta P_{\text{КЗ}}}{\Delta \theta_{\text{MH}}} \tau_n. \quad (6)$$

Известно [2], что температура верхних слоев масла принимает практически установившееся значение через промежуток времени 4τ (практически это 12 ч для трансформаторов ТМ) при постоянной нагрузке. В реальности постоянную нагрузку трансформатора в течение 12 ч поддерживать достаточно сложно, поэтому для определения установившегося превышения температуры и постоянной времени трансформатора можно использовать закон изменения температуры. По данным [6, 7], при равномерном нагреве трансформатора температура верхних слоев масла изменяется по экспоненциальному закону (рис. 1).

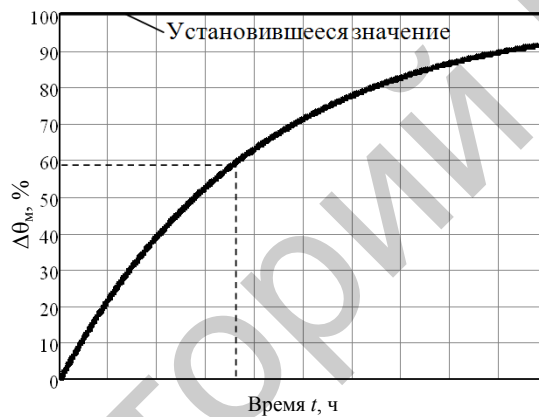


Рис. 1. Экспоненциальная кривая нагрева трансформатора

При нагрузке, условно постоянной в течение только нескольких часов (например, при ночном минимуме), можно построить зависимость изменения превышения температуры верхних слоев масла от времени $\Delta \theta_m(t)$. Аппроксимируя данную зависимость по соотношению

$$\Delta \theta_m(t) = \Delta \theta_m (1 - e^{-t/\tau}), \quad (7)$$

можно определить необходимые значения $\Delta \theta_m$ и τ с достаточной точностью.

После ряда простейших преобразований формулы (3) и (5) образуют систему уравнений:

$$\begin{cases} K^2 \Delta P_n + \Delta P_x = \frac{G}{\tau} \Delta \theta_m; \\ \frac{\Delta P_n}{\Delta P_x} = \frac{\left(\frac{\Delta \theta_m}{\Delta \theta_{\text{MH}}} \right)^{\frac{1}{x}} - 1}{K^2 - \left(\frac{\Delta \theta_m}{\Delta \theta_{\text{MH}}} \right)^{\frac{1}{x}}}. \end{cases} \quad (8)$$

Введем обозначение $(\Delta\theta_m / \Delta\theta_{mn})^x = \xi$ и преобразуем систему (8) к виду:

$$\begin{cases} \Delta P_x = \frac{G}{\tau} \Delta\theta_m - K^2 \frac{\frac{G}{\tau} \Delta\theta_m (\xi - 1)}{[K^2 - \xi] + K^2 (\xi - 1)}; \\ \Delta P_n = \frac{\frac{G}{\tau} \Delta\theta_m (\xi - 1)}{[K^2 - \xi] + K^2 (\xi - 1)}. \end{cases} \quad (9)$$

Из (9) видно, что для определения искоемых потерь мощности в трансформаторе достаточно иметь данные о его коэффициенте загрузки и характере изменения превышения температуры верхних слоев масла во времени. В условиях эксплуатации коэффициент загрузки трансформатора можно достаточно просто определить по показаниям измерительных приборов, установленных на подстанции. Регистрация же температуры вызывает некоторые затруднения. Для измерения температуры верхних слоев масла авторами разработан макет прибора на основе микроконтроллера Arduino, позволяющий считывать и хранить информацию о температуре в карте памяти microSD. Архитектура контроллера дает возможность интегрировать его в цепи тепловой защиты трансформатора. Функциональная схема разработанного устройства представлена на рис. 2.

Температура верхних слоев масла и окружающей среды определяется с помощью двух термометров: первый устанавливается в отверстие для стандартного термометра, второй закрепляется на некотором расстоянии от трансформатора (рис. 3). Текущая температура отображается на ЖК-дисплее прибора и записывается в память через равные промежутки времени. Кроме того, предусмотрена возможность приема прибором SMS-команд и передачи сообщений. Выбор именно GSM-связи обусловлен большой зоной действия сотовой связи, в связи с чем нет необходимости использовать дополнительные передающие устройства. Величину загрузки трансформатора устройство может получать от его измерительных устройств (трансформаторов тока или счетчиков электроэнергии) через аналоговый вход.

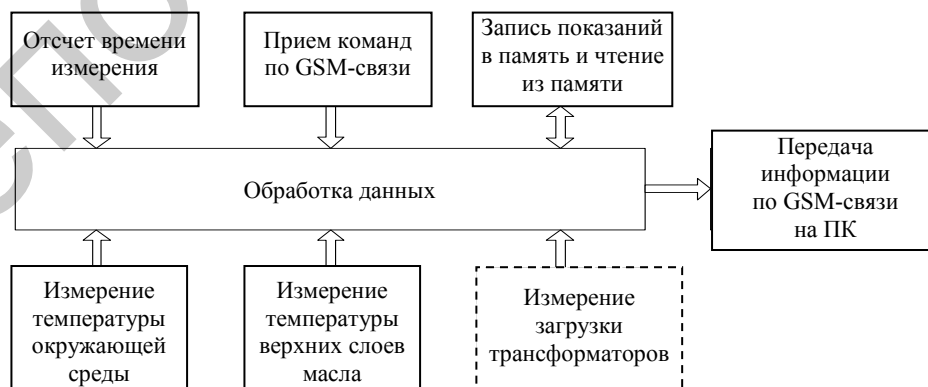


Рис. 2. Функциональная схема разработанного устройства

Немаловажным достоинством прибора является возможность регистрации температуры верхних слоев масла в течение продолжительного периода времени. Информация о температуре окружающей среды и верхних слоев масла считывается с датчиков, обрабатывается контроллером и записывается в память на microSD-карту. Информация может быть считана непосредственно с карты памяти либо по запросу через GSM-команду и использоваться в условиях SMARTGRID электрических сетей.

Динамика изменения температуры верхних слоев масла позволяет определить износ изоляции масляного трансформатора [6] и оценить его эксплуатационный ресурс. В настоящее время существуют разнообразные методики определения текущего технического состояния трансформатора, основанные на химическом анализе трансформаторного масла. Несмотря на то, что методы химического анализа дают достаточно точный результат [8], они весьма затратны и не всегда могут быть выполнены в масштабе предприятия районных электросетей.

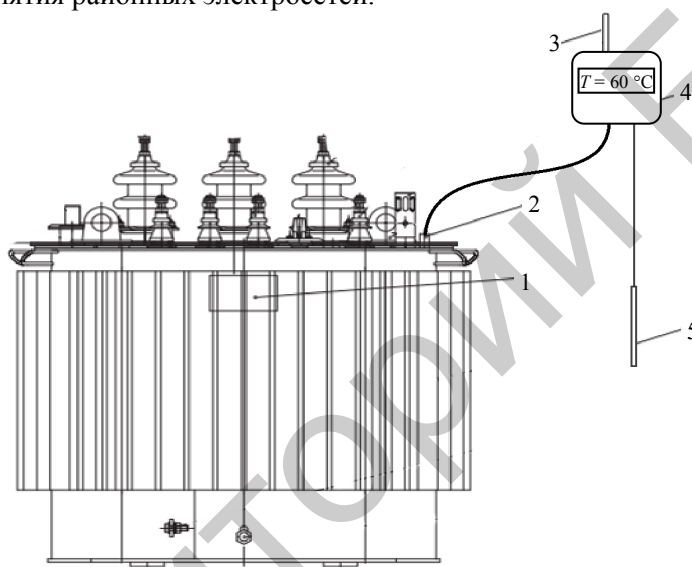


Рис. 3. Схема установки устройства: 1 – бак трансформатора; 2 – масляный термометр; 3 – внешняя GSM антенна; 4 – корпус устройства с ЖК дисплеем; 5 – внешний термометр

Определение реальных технико-экономических показателей трансформаторов позволяет более обоснованно выбирать оптимизационные мероприятия в электрических сетях. В частности, информация о величине потерь в трансформаторе может быть использована в технико-экономических расчетах (например, представленных в [9]), а динамика изменения величины потерь в процессе эксплуатации позволяет прогнозировать состояние трансформатора в долгосрочной перспективе и планировать более качественные оптимизационные мероприятия, такие как капитальный ремонт трансформатора или его замена [10].

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что у трансформаторов со значительным сроком службы значения потерь мощности изменяются вследствие химической деградации материалов.

2. Предложен усовершенствованный метод определения потерь мощности масляного трансформатора для условий SMARTGRID на основе анализа температуры верхних слоев масла.

3. Разработан макет устройства, позволяющего определять потери мощности в трансформаторе и передавать их диспетчеру.

4. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и выборе оптимизационных мероприятий в распределительных электрических сетях с целью улучшения их технико-экономических показателей, а также при планировании других технических мероприятий, например замене трансформатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. М е т о д и к а расчета и обоснования нормативов расхода электроэнергии на ее передачу по электрическим сетям: СТП 09110.09.455–11. – Введ. 28.12.2011. – Минск: ГПО «Белэнерго», 2011. – 51 с.

2. Т р а н с ф о р м а т о р ы силовые. Общие технические условия: ГОСТ 11677–85. – Взамен ГОСТ 11677–75. – Введ. 01.07.1986. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 58 с.

3. К о з а к о в, Ю. Б. Методика определения мощности потерь холостого хода трансформаторов с различным сроком службы [Электронный ресурс] / Ю. Б. Козаков, В. Я. Фролов, А. В. Коротков // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1. – Режим доступа: http://ispu.ru/files/str_20-24.pdf. – Дата доступа: 23.01.2015.

4. Б а л а б и н, А. А. Разработка методики расчета потерь электроэнергии в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся силовых трансформаторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / А. А. Балабин; ГОУ ВПУ «Орловский государственный технический университет». – Орел, 2009. – 18 с.

5. П р а в и л а технической эксплуатации электроустановок потребителей: ТКП 181–2009 (02230). – Введ. 01.09.2009. – Минск: Минэнерго, 2009. – 325 с.

6. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки: ГОСТ 14209–85 (СТ СЭВ 3916–82). – Взамен ГОСТ 14209–69. – Введ. 01.07.85. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 30 с. (Действующий).

7. К а р ш а и, К. Нагрев и охлаждение трансформаторов / К. Каршаи, Д. Кэрэни, Л. Киш; пер. с венг. – М.: Энергия, 1980. – 180 с.

8. Л ь в о в, М. Ю. Разработка и совершенствование методов и критериев оценки технического состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01 / М. Ю. Львов; ОАО «ВНИИЭ». – М., 2009. – 37 с.

9. Ф у р с а н о в, М. И. Планирование замены трансформаторов в распределительных сетях / М. И. Фурсанов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений СССР). – 1983. – № 7. – С. 44–46.

10. Ф у р с а н о в, М. И. Определение эффективности замены трансформаторов с длительным сроком эксплуатации / М. И. Фурсанов, Н. С. Петрашевич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2014. – № 3. – С. 13–19.

REFERENCES

1. S T P 09110.09.455–11. The Method of Estimating and Substantiation of Power Consumption Normatives on its Transmission Over the Electric Networks. Minsk, 2011. 51 p. (in Russian).

2. S t a t e Standard 11677–85. Power Transformers. General Technical Specifications. Moscow, USSR State Committee on Standards, 1990. 58 p. (in Russian).

3. K o z a k o v, Yu. B., Frolov, V. Ya., & Korotkov, A. V. (2012) Estimation Technique for Standby Power Losses of the Transformers with Different Operating Age. *Vestnik IGEU* [Bulletin of Ivanovo State Power University] Available at: http://ispu.ru/files/str_20-24.pdf. (Accessed 23 January 2015) (in Russian).

4. B a l a b i n, A. A. (2009) *Razrabotka Metodiki Rascheta Poter' Elektroenergii v Magnitoprovodakh Dlitel'no Ekspluatiruiushchikhsia Silovykh Transformatorov. Avtoreferat Dissertatsii Kandidata Tekhnicheskikh Nauk* [Developing Estimation Technique for Electric Power Losses in Magnetic Cores of the Long Operating Power Transformers. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences]. Orel. 18 p. (in Russian).

5. T K P 181–2009. Operating Rules and Regulations of the Electric Installations of Consumers. Minsk, Minenergo. 325 p. (in Russian).
6. S t a t e Standard 14209–85. Transformers Power oil for General Purpose. Allowable Load. Moscow, Standards Publishing House, 1985. 30 p. (in Russian).
7. K a r s h a i, K., Kereni, D., & Kish, L. (1980) *Heating and Warming of the Transformers; tr. from Hungarian*. Moscow, Energy. 180 p. (in Russian).
8. L' v o v, M. Yu. (2009) *Razrabotka i Sovershenstvovanie Metodov i Kriteriev Otsenki Tekhnicheskogo Sostoianiia Silovykh Transformatorov i Avtotransformatorov Napriazheniem 110 kV i Vyshe. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Methods and Criteria Developing and Improvement for the Technical State Assessment of Power Transformers and Autotransformers of 110 kV and Higher. Dr. tech. sci. diss]. Moscow. 37 p. (in Russian).
9. F u r s a n o v, M. I. (1983) Planning the Transformers Substitution in Distributing Mains. *Izv. Vyssh. Ucheb. Zavedenii SSSR – Energetika* [Proceedings of the USSR Higher Education Institutions – Energetics], 7, 44–46 (in Russian).
10. F u r s a n o v, M. I., & Petrashevich, N. S. (2014) Substitution Efficiency Evaluation of the Transformers with Long Operating Life. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 3, 13–19 (in Russian).

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 25.05.2015

УДК 621.316.925

УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОЙ ГРУППЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В СИСТЕМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Канд. техн. наук, доц. **НОВАШ И. В.**, асп. **РУМЯНЦЕВ Ю. В.**

Белорусский национальный технический университет

E-mail: novashiv@tut.by

Представлена и обоснована методика реализации упрощенной математической модели трехфазной группы трансформаторов тока на основе паспортных (номинальных) данных трансформаторов тока, входящих в моделируемую трехфазную группу. По приведенной методике в среде динамического моделирования MatLab–Simulink–SimPower-Systems реализована упрощенная математическая модель трехфазной группы трансформаторов тока с соединением вторичных обмоток и нагрузок по схеме «звезда с нулевым проводом». Данная модель позволяет получать форму кривой вторичного тока, используя лишь паспортные данные моделируемого трансформатора тока. Таким образом, рассматриваемая модель дает возможность оценивать применимость трансформатора тока с точки зрения правильного функционирования устройств релейной защиты при переходных процессах в энергосистеме.

С помощью данной модели проведены вычислительные эксперименты, соответствующие характерным режимам работы трансформатора тока: протекание тока короткого замыкания с наличием/отсутствием аperiodической составляющей и протекание тока короткого замыкания с наличием аperiodической составляющей и остаточной намагнитченности трансформатора тока. Рассмотрены режимы неуспешного автоматического повторного включения при различной фазе включения выключателя. Для каждого характерного случая построены осциллограммы.

Проведено сравнение двух способов задания кривой намагничивания стали магнитопровода трансформатора тока: ручная аппроксимация и аппроксимация по формуле Оллендорфа. На основании данного сравнения сделан вывод о возможности применения аппроксимирующей функции кривой намагничивания для анализа работы транс-