Effect of Technical Parameters of Electric Low Voltage Devices of the Shop Power Supply Systems on their Reliability Characteristics

Gracheva E.I.[1], Ivshin I.V.[1], Gorlov A.N. [2], Alimova A.N.[1]
[1]Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russia
[2]South-Western State University
Kursk, Russia

Abstract. The article deals with an integrated approach to the study of the functioning efficiency of low-voltage switching devices as elements of shop networks during their operation. Based on the results of experimental studies of the contact connections of devices using a thermal imaging equipment, a new criterion is offered for the estimation of the technical condition of devices, namely, the coefficient of actual multiplicity exceeding the contact resistance under operating conditions. Its calculated numerical values for circuit breakers, contactors, magnetic starters, knife switches and batch switches are determined that allow evaluating their technical condition and operation. They also prevent the development of defects in the switching equipment and failures and make it possible to use the developed criterium for the supplemental regulation periods of investigations of switching devices. An algorithm and a method have been elaborated for a comprehensive assessment of the functioning efficiency of the switching low-voltage devices, which allows establishing a relationship between the probability of up-time and the contact resistance of devices considering the number of switching cycles. The contact resistance is considered as a random function of the number of switching cycles. The studies carried out according to the developed algorithm with the identification of the functional relationship between the contact resistance parameters and the probability of failure-free operation of the devices installed on the lines of the networks allow us to evaluate the technical condition of the equipment. The amount of the electricity losses and characteristics reliability of the internal power supply systems can also be specified.

***Keywords*:** electrical apparatus, failure-free operation, reliability, electricity, power circuits, resistance of contact connections.
DOI: 10.5281/zenodo.3367062

Influența a parametrilor tehnice de aparatele electrice pentru sistemele de aprovizionare cu energie electrică asupra caracterisiticile lor de fiabilitate

Graceva E.I., [1] Ivșin I.V., [1] Gorlov A.N., [2] Alimova A.N. [1]
[1] Universitatea de Stat energetică din Cazani
Cazani, Federația Rusă
[2]Universitatea de Sud-Vest de Stat
Cursc, Federația Rusă

Rezumat. Scopul acestei lucrări este o nouă abordare la studiul eficienței aparatelor de comutare în procesul de funcționare a acestora. Obiectivul stabilit în lucrare a fost realizat prin urmare a studiilor experimentale și teoretice, utilizând controlul imagistic termic. Cele mai importante rezultate sunt: elaborarea unui nou criteriu pentru evaluarea stării tehnice a dispozitivelor - coeficientul de multiplicitate reală, rezistența de contact în exces în condiții de funcționare și determinarea valorilor sale numerice pentru întrerupătoare, contactoare, startere magnetice, întrerupătoare cu cuțite și întrerupătoare, care ne permit să evaluăm starea tehnică și funcționarea acestora, preveni dezvoltarea defectelor la echipamentele de comutare și accidentele, utilizați criteriul elaborat pentru regulamentul suplimentar de reglementări privind calendarul sondajelor echipamentelor de comutare. Semnificația rezultatelor obținute constă în obținerea, conform datelor experimentelor, a dependențelor empirice ale rezistențelor inițiale ale conexiunilor de contact ale dispozitivelor de valoarea curentului nominal. Conform examinărilor de imagistică termică, au fost stabilite tipuri de deteriorare a aparatului și au fost obținute dependențele rezistenței de contact a echipamentului defect la temperatura sistemelor de contact ale aparatului la diferitele lor moduri de încărcare. A fost elaborat un algoritm și o metodă pentru o evaluare cuprinzătoare a eficienței de funcționare a dispozitivelor de comutație de joasă tensiune, care permite stabilirea unei relații între probabilitatea de funcționare și rezistența de contact a dispozitivelor. În acest caz, rezistența de contact este considerată o funcție aleatorie a numărului de cicluri de comutare. Conform rezultatelor studiilor experimentale, pentru a obține o valoare critică a rezistenței dispozitivului, se obține o creștere medie de trei ori a rezistenței inițiale.

© Грачева Е.И., Ившин И.В., Горлов А.Н., Алимова А.Н., 2019

Cuvinte-cheie: dispozitive, fiabilitate, fiabilitate, electricitate, circuite de alimentare, rezistență la contact.

Влияние технических параметров электрических аппаратов систем электроснабжения на их характеристики надежности

Грачева Е.И. [1], Ившин И.В. [1], Горлов А.Н. [2], Алимова А.Н. [1]
[1]Казанский государственный энергетический университет
Казань, Россия
[2]Юго-Западный Государственный Университет
Курск, Россия

Аннотация. Целью данной работы предлагается новый подход к исследованию эффективности функционирования коммутационных аппаратов в процессе их эксплуатации. Поставленная в работе цель достигнута в результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований с помощью тепловизионного контроля. Наиболее важными результатами являются: разработка нового критерия оценки технического состояния аппаратов – коэффициента фактической кратности превышение сопротивления контактов по условиям эксплуатационных режимов и определение его численных для автоматических выключателей, контакторов, магнитных пускателей, рубильников и пакетных выключателей, которые позволяют оценивать их техническое состояние и эксплуатацию, не допускать развитие дефектов коммутационной аппаратуры и аварии, использовать разработанный критерий для вспомогательного регламента сроков проводимых обследований коммутационной аппаратуры. Значимость полученных результатов состоит в получении по данным проведенных экспериментов значений эмпирических зависимостей начальных сопротивлений контактных соединений аппаратов от величины номинального тока. По данным тепловизионных обследований установлены виды повреждений аппаратов и получены зависимости сопротивлений контактных соединений дефектного оборудования от температуры контактных систем аппаратов при их различных режимах загрузки. Разработаны алгоритм и метод комплексной оценки эффективности функционирования коммутационных низковольтных аппаратов позволяющие установить зависимость между вероятностью времени безотказной работы и сопротивления контактов аппаратов с учетом количества циклов коммутаций. При этом сопротивления контактов рассматривается как случайная функция количества коммутационных циклов. По результатам проведенных экспериментальных исследований для достижения критического значения сопротивления аппарата принимается в среднем трехкратное увеличение начального сопротивления. Проведенные согласно разработанному алгоритму исследования с выявлением функциональной зависимости между параметрами сопротивлений контактов и вероятности времени безотказной работы аппаратов позволяют оценивать техническое состояние оборудования уточнять величину потерь электроэнергии и характеристик надежности систем электроснабжения.

Ключевые слова: аппараты, безотказность, надежность, электроэнергия, силовые цепи, сопротивления контактных соединений.

ВВЕДЕНИЕ

Достаточно долгое время развитие электроэнергетики в России проходило по экстенсивному пути, в связи с тем, что по большей части оно имело направленность на обеспечение потребности в электрической энергии промышленного, сельского и коммунально-бытового секторов, которое постоянно растет. Распределение и качество электроэнергии остаются ключевыми проблемами, стоящими перед электроэнергетической отраслью. Выбор подходящего оборудования и архитектуры для конкретного приложения означает разницу между успехом и провалом [1; 2]. В статье продолжается развитие данной темы на конкретных примерах. Благодаря высокому влиянию на стоимость электроэнергии и его прямой зависимости от удовлетворенности потребителей, надежность распределения остается одной из наиболее важных тем в электроэнергетике. Авторы рассматривают как избежать распространенных ошибок при проведении тестирования электрооборудования, как применять эффективное управление рисками [3; 4; 5]. Условия множества потребителей электрической энергии к поставщикам, связанные с обеспечением надежности в России были монотипными и в свою очередь сводились к регламентации допустимой длительности отключения и последствий нарушения электроснабжения.

Грилл П. и другие зарубежные авторы охватывают все аспекты тестирования и обслуживания оборудования энергосистем, обслуживающих различные подстанции и установки, рассматриваются практические аспекты тестирования и обслуживания, а также представлены методологии и основы разработки, необходимые для выполнения этих задач [6; 7; 8]. На данной стадии формирования энергетики устойчивость и качество поставляемой электроэнергии не рассматривались энергоснабжающими организациями, в силу их монопольного положения, как главные условия

во взаимоотношениях с потребителями электрической энергии и все обусловливалось категориями электроприемников.

В статьях Элайна А.Л. и Алзенира Р. построены два вспомогательных индекса: базовое состояние и рабочее состояние, представляющие физические и функциональные характеристики оборудования, которые могут поставить под угрозу его производительность и способствовать возникновению сбоев. Их оценке помогает индекс технической мощности, который оценивает, насколько сильно на оборудование повлияли условия эксплуатации. В этой работе представлены общие положения, но опускается рассмотрение сопротивления контактов [9; 10; 11].

Шаоди Х. и Ли К. в целях эффективного повышения стабильности работы оборудования и продления его срока службы, на основе анализа причин неисправностей электрооборудования с токопроводящей нагрузкой предлагают подход раннего предупреждения о неисправности, основанный на эквивалентных сопротивлениях. Во-первых, модель зависимости между сопротивлением, нагрузкой и температурой устанавливается на основе теории теплопередачи. Затем модель используется для расчета эквивалентного сопротивления контактора. После этого предлагается метод извлечения признаков неисправности по отношению нагрузки между различными контакторами на основе анализа эквивалентного сопротивления [12; 13; 14].

Георгита С.М. и др. утверждают, что контактные соединения являются важными элементами электрических установок. Наличие электрического контакта на пути движения тока всегда вносит дополнительное электрическое сопротивление, называемое контактным сопротивлением.

После обзора роли контактов в электрической цепи представлено изменение сопротивления контактов с изменением температуры и времени [15;16; 17]. Соуза Р.Т. и др. считают, поскольку электрические контакты являются токоведущими частями, необходимо, чтобы они характеризовались высокой безопасностью, соответствующей устойчивостью к различным напряжениям различной природы (механические, электрические, факторы окружающей среды) и достаточной термической и электродинамической устойчивостью [18; 19; 20].

На современном этапе развития, в связи с тем, что происходит существенное возрастание тарифов на электрическую энергию и происходит перестройка структуры состава потребителей электроэнергии, так как начинают использовать современные высокопроизводительные устройства и технологии, которые в свою очередь более восприимчивы к снижению устойчивости и к нарушению характеристик качества электроэнергии, к данной проблеме меняется отношение заказчиков

Встает вопрос о необходимости исследования технического состояния эффективности функционирования контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов на основании экспериментальных и расчетных данных, так как он не освещается в научной и справочной литературе и проведенное исследование не имеет аналогов.

Можно предположить, что температуры нагрева коммутационных аппаратов при равных условиях эксплуатации в момент измерения (рабочий ток и коэффициент загрузки) не равны между собой. Следствием неравенства температур является неравенство сопротивлений контактных соединений. Причина этого – в имеющихся пленках на контактах аппаратов.

НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ

Тепловизионное обследование низковольтного оборудования выявило, что в дефектных электрических аппаратах из-за образования контактных пленок и неровностей площади контактирования наблюдается недопустимое увеличение температуры контактных соединений.

При тепловизионном контроле анализируется состояние недогруженных контактных групп. Вычисление превышения замеров фактической температуры по отношению к нормированному для величины токов $(0,6\ -\ 1)\cdot I_{nom}$ осуществляется в соответствии

$$\frac{\Delta t_{nom}}{\Delta t_w} = \left(\frac{I_{nom}}{I_w}\right)^2 , \qquad (1)$$

где Δt_{nom} и Δt_w – превышения температуры при токах I_{nom}, I_w.

Для контактов и контактных соединений, работающих при токах нагрузки $(0.3-0.6)\cdot I_{nom}$, соотношение имеет вид

$$\frac{\Delta t_{0.5}}{\Delta t_w} = \left(\frac{0.5 I_{nom}}{I_w}\right)^2 , \qquad (2)$$

где $\Delta t_{0.5}$ – превышение температуры при токе $0.5 I_{nom}$.

Согласно ГОСТ 12393-2013 техническое состояние контактных соединений аппаратов, а

также систем служащих для соединения проводов, кабелей, шин электрооборудования вычисляется при помощи двух параметров

- характеристики оценки дефекта по перегреву K_d контактного соединения,

- избыточной температуры *t* аналогичных контактных соединений других фаз при $0.5I_{nom}$ [21].

Коэффициент дефектности K_d соответствует отношению удельного теплового потока Джоуля, выделившегося в контактном соединении к удельному тепловому потоку, вне контактных соединений. Удельный тепловой поток с поверхности в соответствии с теплоотдачей в воздух и теплового излучения, вычисляется по выражению

$$c = \beta \cdot (t - t_{env}), \quad (3)$$

где β – показатель теплоотдачи с поверхности; t – температура площади поверхности; t_{env} – температура окружающей среды.

Тогда коэффициент дефектности

$$K_d = \frac{\Delta t_{cc}}{\Delta t_{cw}}, \quad (4)$$

где Δt_{cc} и Δt_{cw} превышение температуры контактного соединения коммутационного аппарата и соединяемого провода вне арматуры (на расстоянии не менее 1 м от зажима) над температурой окружающего воздуха при протекании по ним одного и того же тока.

При учете соотношения для количества теплоты коэффициент дефектности определяется

$$K_d = \frac{I^2 r}{I^2 r_{cw}} = \frac{r}{r_{cw}}, \quad (5)$$

где I – сила тока; r и r_{cw} – сопротивление контактного соединения коммутационного аппарата и провода.

Известно, что эксплуатационное состояние электрического контакта зависит от тока, площади контактной системы, силы затяжки (для болтовых соединений) а также определяется коррозией, нагаром и т.д. При определении соотношения повышений температур тепловизором и пользуясь выражениями (4) и (5), косвенно оценивается техническое состояние контактной системы.

В электроэнергетике по нормам испытаний оборудования [22] анализируется состояние контактных соединений: при $K_d < 1.2$ – слабое развитие дефектности, требуется постоянный контроль; $1.2 \le K_d \le 1.5$ – развивающийся дефект, необходимо устранять неисправность при ближайшем выводе электрооборудования из эксплуатации; $K_d > 1.5$ – аварийный дефект, необходимо срочное устранение.

Избыточная температура – это превышение измеренной температуры исследуемого соединения по отношению к температуре замеров фактических соединений других фаз.

Сопротивление контактных соединений электрических аппаратов вычисляется по выражению [21; 22]

$$R_{cc} = \frac{2\sqrt{\lambda \cdot f \cdot k_m \cdot S}}{I^2} \cdot \left(\theta_к - \frac{I^2 \cdot \rho(1 + \alpha \cdot \vartheta_c)}{k_m \cdot f \cdot S} \right), \quad (6)$$

где λ – теплопроводность материала проводника, для меди $\lambda = 390$ Вт/(м·К); f – поверхность охлаждения, м^2 ($f = 2 \cdot (c + d) \cdot 1 \cdot 10^{-3}$ при прямоугольной поверхности; $f = 2\pi r \cdot 1 \cdot 10^{-3}$ при круглой поверхности); k_m – коэффициент теплоотдачи, для меди $k_m = 16$ Вт/(м^2·К); S – контурная площадка касания контактных соединений, м^2 $(S = c \cdot d)$ для прямоугольной поверхности; $S = \pi r^2$ для круглой поверхности); I – ток через контакты, А ($I = K_l \cdot I_n$, где K_l – коэффициент загрузки); ϑ_c – температура контактных площадок ($\vartheta_c = \Delta t + t_n$; Δt – избыточная температура, превышение измеренной температуры исследуемого соединения над температурой t_s (таблица 1), t_n – температура контактного соединения аппарата на заведомо исправных участках электрооборудования (таблица 2)); θ_k – допустимый перепад температуры контакта над температурой окружающей среды, $\theta_k = 45$°C ; ρ – удельное электрическое сопротивление, для меди $\rho = 1.62 \cdot 10^{-8}$ Ом/м^2; α – температурный коэффициент сопротивления, для меди $\alpha = 0.0043$.

Температура контактной системы коммутационного аппарата на заведомо исправных участках электрооборудования [21, 22]

$$t_{cc} = \frac{I^2 \left(t_{perm} - t_{env} \right)}{I_{perm}^2} + t_{env}, \quad (7)$$

где t_{perm} – допустимая температура нагревания частей аппаратов при температуре окружающей среды 40°C (величины допустимых превышений температуры для аппаратов, работающих при

температуре окружающей среды, не равной принятой расчетной (40°C), изменяются так, чтобы допустимая температура элементов аппаратов, вычисляемая суммированием превышения и расчетной температуры окружающей среды, оставалась постоянной [22]); t_{env} – температура окружающей среды.

Таблица 1[1].

Значение температуры контактных соединений аппаратов на заведомо исправных участках[2]

№ п/п	Секция, панель Section, panel	Тип низковольтного электрического аппарата Type of low voltage electrical apparatus	Рабочий ток I_w, А The operating current, I_w, A			Температура контактной системы, °C Contact system temperature, °C		
			11.16.	03.17.	03.18.	11.16.	03.17.	03.18.
1	Цех №1 Shop N1	Рубильник Knife switch	46	48	41	34	35	32
2	Цех №2 Shop N2	Предохранитель Fuse		34	30		28	27
3	Цех №3 Shop N3	Магнитный пускатель Magnetic switch		27	28		25	25
4	Цех №4 Shop N4	Автоматический выключатель Circuit breaker	41	39	39,5	32	30	27
5	Цех №5 Shop N5	Автоматический выключатель Circuit breaker		23	23		24	24
6	Цех №6 Shop N6	Контактор Contactor		53	49		38	36

Таблица 2[3].

Данные тепловизионного обследования[4]

№ п/п	Секция, панель Section, panel	Дефектное соединение Defective compound	Вид дефекта Type of defect	11.16.		03.17.		03.18.		Ток аппарата I_p, А Apparatus current I_p, A			Сопротивление контакта r_{cc}, мОм Resistance contact r_{cc}, mOhm		
				Избыточная температура, Excessive actual temperature, °C						11.16.	03.17.	03.18.	11.16.	03.17.	03.18.
1	Цех №1 Shop N1	Рубильник Knife switch	нагревание БКС (фаза А) Heating of PCU (phase A)	64	98	36	38	35	51	46	48	41	1.6	1.2	1.1
2	Цех №2 Shop N2	Предохранитель Fuse				36	38	35	51		34	30		0.6	0.71
3	Цех №3 Shop N3	Магнитный пускатель Magnetic switch				36	38	35	51		27	28		17.3	17.1
4	Цех №4 Shop N4	Автоматический выключатель Circuit breaker		69	99	36	38	35	51	41	39	39	6.9	7.0	6.3
5	Цех №5 Shop N5	Автоматический выключатель Circuit breaker	Нагревание БКС Heating of PCU			36	38	35	51		23	23		8.6	6.8
6	Цех №6 Shop N6	Контактор Contactor				36	38	35	51		53	49		8.1	6.2

[1,2,3,4] Appendix 1

После подстановки значений в (7) температура контактной системы автоматического выключателя на заведомо исправных участках электрооборудования в марте 2018 г. (таблица 1, п. 4) будет равна $t_{cc} = 30°C = 303\ K$. Тогда сопротивление контактной системы автоматического выключателя по (6) составит $r_{cc} = 0{,}007$ Ом.

Результаты вычислений сопротивлений контактных соединений аппаратов приведены в таблице 2.

Теоретические данные соответствуют результатам экспериментальных исследований, показавшим, что сопротивление контактных соединений коммутационных аппаратов, измеренное микроомметром Ф 4104-М1, не отличается от вычисленного более чем на 14 % [23; 24]

В результате экспериментов установлено, что температуры нагрева контактов коммутационных аппаратов при равных условиях эксплуатации в момент измерения не равны между собой. Следствием неравенства температур является неравенство сопротивлений контактных соединений. Причина этого – в имеющихся пленках на контактах аппаратов [12; 18].

Тепловизионное обследование низковольтного оборудования выявило, что в аппаратах из-за образования контактных пленок и неровностей площади контактирования наблюдается недопустимое увеличение температуры контактных соединений. В результате чего сопротивление контактов относительно начального увеличилось в среднем в 1,9–3 раза.

Значение коэффициента фактической кратности превышения сопротивления контактов электрических аппаратов по условиям эксплуатационных режимов определяется:

$$K_{ex.r.} = \frac{R_{act}}{R_{in}}, \qquad (8)$$

где R_{in} – начальное сопротивление контактов аппарата до эксплуатации (таблица 4); R_{act} – фактическое сопротивление контактов аппарата в эксплуатационных режимах.

Графики зависимости сопротивлений контактов аппаратов от температуры контактной системы приведены на рисунке 1

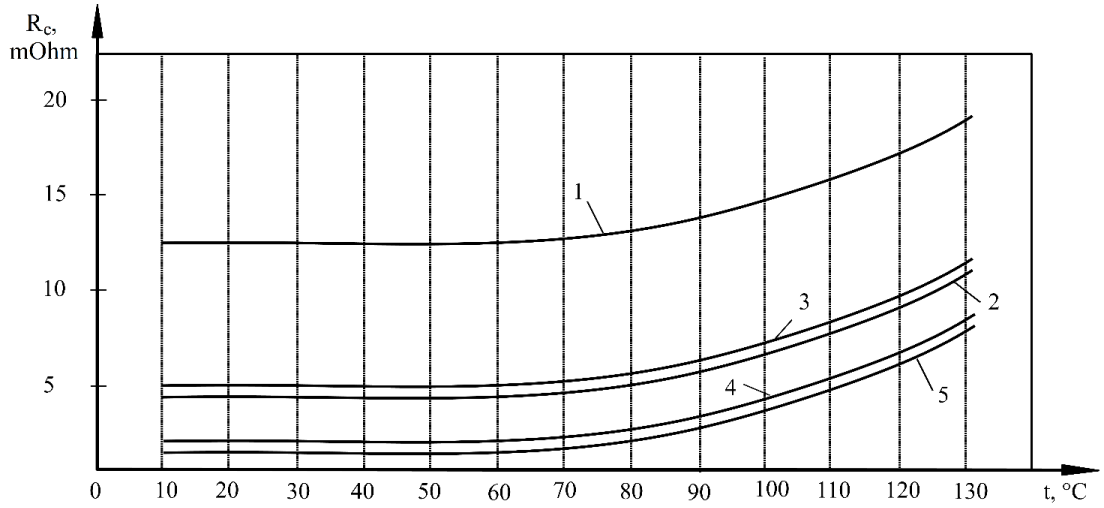

Рис. 1. Графики зависимости сопротивлений контактных соединений аппаратов от температуры контактных площадок при K_l = 0,5 (1 – магнитный пускатель, I_{nom} = 63 А; 2 – автоматический выключатель, I_{nom} = 63 А; 3 – контактор, I_{nom} = 63 А; 4 – рубильник, I_{nom} = 63 А; 5 – выключатель пакетный, I_{nom} = 63 А).[5]

Полученные статистические данные ежегодного тепловизионного обследования контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов позволили обосновать допустимые кратности превышения сопротивления контактов аппаратов по условию достижения предельно допустимой температуры нагрева контактов:

— для автоматических выключателей в 2.9 раза;

— для контакторов в 3.0 раза;

— для магнитных пускателей в 3.1 раза;

— для рубильников в 2.3 раза;

— для пакетных выключателей в 2.1 раза.

Для определения сопротивления контактных соединений с помощью номограмм, представленных на рисунке 1, необходимо рассчитать значение температуры контактной системы, например для магнитного пускателя

[5] Appendix 1

$$t_{cs} = \frac{27^2\left(\left(65+40\right)-20\right)}{63^2} + 20 + 68 = 107 .$$

Затем по оси абсцисс на рисунке 6 отложить полученное значение 107 и провести вертикально линию до пересечения с графиком, соответствующим исследуемому аппарату. На оси ординат отложится искомое значение контактного сопротивления, равное 14 мОм. При этом сопротивление контактов аппарата при измерении микроомметром, равно 14,1 мОм, что позволяет применять показанные номограммы для практического использования.

Таким образом, представленные результаты проведенных тепловизионных обследований позволяют оценивать эксплуатационное состояние низковольтных коммутационных аппаратов по критерию допустимой кратности превышения сопротивления контактных соединений и предотвращать развитие дефектов коммутационной аппаратуры и аварийные ситуации, а также использовать предлагаемый критерий в качестве дополнительного регламента сроков проводимых обследований коммутационной аппаратуры.

Комплексное исследование эффективности функционирования электрических аппаратов низкого напряжения. По результатам проведенных экспериментальных исследований для достижения критического значения сопротивления аппарата принимается в среднем трехкратное увеличение начального сопротивления

$$R_{cr} = k_{ex.r.} \cdot R_{in} \qquad (9)$$

где $k_{ex.r}$ – коэффициент, допустимой кратности превышения сопротивления контактов.

Начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата R_{in} вычисляется на основании выражений, представленных в таблице 3.

Таблица 3[6].

Значение эмпирических зависимостей начальных сопротивлений контактных соединений аппаратов от величины номинального тока[7]

Тип аппарата Type of apparatus	Величина номинального тока, I_{nom}, А Rated current I_{nom}, A	Эмпирическая зависимость сопротивления от номинального тока Empirical dependence of resistance on the value of the rated current
Магнитный пускатель Magnetic switch	< 75	$R_{in} = 820 / I_{nom}$
	≥ 75	$R_{in} = 770 / I_{nom}$
Автоматический выключатель и контактор Circuit breaker and contactor	< 65	$R_{in} = 350 / I_{nom}$
	≥ 65	$R_{in} = 310 / I_{nom}$
Предохранитель Fuse	< 100	$R_{in} = 200 / I_{nom}$
	≥ 100	$R_{in} = 120 / I_{nom}$
Рубильник и пакетный выключатель Knife switch and switch packet	Любое значение Every value	$R_{in} = 70 / I_{nom}$

Сопротивление контактов можно рассматривать как случайную функцию количества коммутационных циклов $R(z)$

$$R(z) = R_{in} + \int_0^z v dz , \qquad (10)$$

где R_{in} – начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата; v – скорость изменения сопротивления контактов.

Вероятность исправной работы контактов аппарата определяется выражением

$$P(r) = \int_{R_{in}}^{R_{cr}} f(r) dr . \qquad (11)$$

Нижний предел интегрирования R_{in} определяет среднее значение начального сопротивления контактов всей выборки значений, а верхний – среднее значение критического сопротивления R_{cr} выборки значений сопротивлений аппаратов.

Так как текущие значения $R(z)$ распределяются по нормальному закону, то

$$P(r) = \int_{R_{in}}^{R_{cr}} 1\Big/\sqrt{2\pi\sigma_R} \cdot \exp\left[-\left(R - R_{mid}\right)\Big/2\sigma_r^2\right] dR , \qquad (12)$$

где R_{mid} – среднее значение сопротивления контактов генеральной совокупности аппаратов;

[6,7] Appendix 1

σ_R – среднеквадратическое отклонение сопротивления.

У некоррелированных веерных случайных функций среднеквадратические отклонения:

$$\sigma_R(z) = \sigma_v z \qquad (13)$$

где σ_v – среднеквадратическое отклонение углового коэффициента v.

Вычисление плотности вероятности безотказно выполненных циклов «включения-отключения» $f(z)$ необходимо продифференцировать выражение (11) по числу циклов. Вместо R и σ_R подставляются значения $R(z)$ и $\sigma_R(z)$ из выражений (9) и (12). Значение dr/dz определяет среднюю скорость изменения сопротивления.

Из выражения (10)

$$dR = vdz \text{ или } dR = \left[\left(R - R_{in.mid}\right)/z\right]dz\,. \qquad (14)$$

Таким образом, после дифференцирования и преобразований получим

$$f(z) = 1\Big/\sqrt{2\pi\sigma_v z^2}\left\{3\sigma_{R_{in}}\cdot\right.$$
$$\cdot\exp\left[-0.5\cdot\left(\sigma_{R_{in}}/\sigma_v z + v_{mid}/\sigma_v\right)^2\right] + \left(R_{cr} - R_{in.mid}\right)\cdot$$
$$\left.\cdot\exp\left[-0.5\cdot\left(v_{mid}/\sigma_v - \left(R_{cr} - R_{in.mid}\right)/\left(\sigma_v\cdot z\right)\right)^2\right]\right\} \qquad (15)$$

В таблице 4 указаны начальные значения сопротивления контактов пускателей и критические значения контактного сопротивления.

Таблица 4[8].

Данные для расчета надежности магнитных пускателей[9]

№	Номинальный ток I_n, А Rated current I_n, A	Начальное сопротивление r_0, мОм Initial resistance r_0, mOhm	Критическое значение сопротивления r_{cr}, мОм Critical resistance r_{cr} ,mOhm	Скорость изменения сопротивления v, мОм/цикл Resistance rate v mOhm / cycle
1	63	13.1	39.3	$1.14\cdot10^{-5}$
2		13.2	39.6	$2.14\cdot10^{-5}$
3		13.1	39.3	$1.14\cdot10^{-5}$
4		13.1	39.3	$1.14\cdot10^{-5}$
5		13.1	39.3	$1.14\cdot10^{-5}$
6		13.7	41.1	$7.14\cdot10^{-5}$
7		13.4	40.2	$4.14\cdot10^{-5}$
8		13.1	39.3	$1.14\cdot10^{-5}$
9		13.1	39,3	$1.14\cdot10^{-5}$
10		13.1	39.6	$1.14\cdot10^{-5}$

Для практических расчетов можно упростить полученное выражение. Обозначим коэффициенты вариации скорости и начального сопротивления соответственно S и S_1, т.е.

$$S = \frac{\sigma_v}{v_{mid}}; \qquad (16)$$

$$S_1 = \frac{\sigma_R}{R_{in.mid}}; \qquad (17)$$

$$\theta_1 = \frac{3\cdot S_1\cdot R_{in.mid}}{v_{mid}}; \qquad (18)$$

$$\theta_2 = \frac{R_{cr} - R_{in.mid}}{v_{mid}}. \qquad (19)$$

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}}\left\{\frac{\theta_1}{S}\cdot\exp\left[-0.5\cdot^2\left(\frac{1+\frac{\theta_1}{z}}{S}\right)^2\right] + \right.$$
$$\left. + \frac{\theta_2}{S}\cdot\exp\left[-0.5\cdot\left(\frac{1-\frac{\theta_2}{z}}{S}\right)^2\right]\right\} \qquad (20)$$

Вероятность времени безотказной работы контактов электрических аппаратов

$$P(z) = 1 - \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\left\{\frac{\theta_1}{S}\cdot\exp\left[-0.5\cdot\left(\frac{1+\frac{\theta_1}{z}}{S}\right)^2\right] + \right.$$

[8,9] Appendix 1

$$+\frac{\theta_2}{S}\cdot\exp\left[-0.5\cdot\left(\frac{1-\frac{\theta_2}{z}}{S}\right)^2\right]\Bigg\}dz. \qquad (21)$$

Выборочная средняя величина начального сопротивления магнитного пускателя определяется по выражению

$$\bar{R}=\frac{\sum_{i=1}^{n}R_i}{n}=13.2\text{ мОм.}$$

где $\bar{R}$ — выборочная средняя величина.

Среднеквадратическое отклонение выборки сопротивлений магнитного пускателя

$$\sigma_{m.s}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(R_i-\bar{R}\right)^2}{(n-1)}}=0.2.$$

Ордината полюса принимается равной $R_{in.mid}$ по выражению

$$R_{in.mid}=\bar{R}+K\cdot\sigma_{m.s} \qquad (22)$$

где K определяется числом испытанных образцов изделий n и доверительной вероятностью α, с которой гарантируется вычисление $R_{in.mid}$.

$$R_{in.mid}=13,2+0,65\cdot 0,2=14.3\text{ мОм.}$$

Среднее критическое сопротивление R_{cr}

$$\bar{R}_{cr}=\frac{\sum_{i=1}^{n}R_{i\ cr}}{n}=39.6\ \text{ мОм.}$$

Скорость изменения сопротивления контактов магнитного пускателя определяем по выражению (14)

$$v=\frac{R-R_{in.mid}}{z}=1.14\cdot 10^{-5}\text{ Ом/цикл.}$$

Выборочная средняя величина скорости изменения сопротивления магнитного пускателя определяется по равенству

$$v_{mid}=\frac{\sum_{i=1}^{n}v_i}{n}=2.14\cdot 10^{-5}\text{ Ом/цикл.}$$

Среднее квадратическое отклонение скорости изменения сопротивлений магнитного пускателя

$$\sigma_v=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(v_i-v_{cp}\right)^2}{n-1}}=2\cdot 10^{-5}\text{ Ом/цикл.}$$

В таблице 5 приведена информация для построения кривых зависимости безотказности контактов магнитных пускателей с $I_n=40$ А и $I_n=80$ А от числа циклов «включения-отключения». Данные таблицы 5 послужили основой для построения графиков зависимостей сопротивлений контактов магнитных пускателей, контакторов, автоматических выключателей от количества коммутационных циклов и зависимость вероятности времени безотказной работы контактов магнитных пускателей, контакторов и автоматических выключателей от количества коммутационных циклов.

По данным таблицы 5 построены графики зависимостей средней величины сопротивления и безотказности контактов магнитных пускателей от числа циклов «включения-отключения» – рисунок 2 (кривые 1, 2, 3).

Зависимость определяется по формуле (21) и показана на рисунке 2 (кривые 4 и 6).

На графике (рисунок 3) по оси абсцисс отложено число включений и отключений (циклов) контакторов за время эксплуатации. Выборка начальных сопротивлений контактов автоматических выключателей составлена для автоматических выключателей. На графике (рисунок 4) по оси абсцисс отложено число включений и отключений (циклов) автоматических выключателей за время эксплуатации.

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД

В ходе экспериментов в результате проведенных исследований [25] установлены размеры контактов аппаратов. Используя размеры контактов аппаратов, определим сопротивление контактов в зависимости от номинального тока и коэффициента загрузки:

$$R_{cc}=\frac{2\sqrt{\lambda f k_m S}}{\left(I_n\cdot k_l\right)^2}\cdot\left(\theta_\kappa-\frac{\left(I_n\cdot k_l\right)^2\rho\left(1+\alpha\vartheta_c\right)}{k_m fS}\right)., \qquad (27)$$

где λ – теплопроводность материала проводника, для меди $\lambda=390$ Вт/(м·К); f – поверхность охлаждения, м^2 ($f = 2(c+d)\cdot 1\cdot 10^{-3}$ при прямоугольной поверхности; $f = 2\pi r\cdot 1\cdot 10^{-3}$ при круглой поверхности); k_m – коэффициент тепло-

отдачи, для меди $k_m = 16$ Вт/(м²·К); S – контурная площадка касания контактных соединений, м² ($S = c \cdot d$ для прямоугольной поверхности; $S = \pi r^2$ для круглой поверхности);

Таблица 5[10].

Зависимость вероятности времени безотказной работы контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов[11]

Номинальный ток магнитного пускателя I_r of the magnetic starter	S	S_1	θ_1, 10^6	θ_2, 10^6	$z \cdot 10^6$ циклов $z \cdot 10^6$ cycles	$P(z)$
$I_n =$ 40 A	0.81	0.01	0.027	1.68	1	0.98
					2	0.92
					3	0.85
					4	0.78
					5	0.73
					6	0.58
					7	0.42
					8	0.40
					9	0.37
					10	0.35
$I_n =$ 63 A	0.93	0.01	0.028	1.24	1	0.98
					2	0.93
					3	0.87
					4	0.79
					5	0.74
					6	0.59
					7	0.43
					8	0.42
					9	0.40
					10	0.38
$I_n =$ 80 A	0.52	0.006	0.002	2.7	1	0.99
					2	0.95
					3	0.91
					4	0.85
					5	0.77
					6	0.63
					7	0.46
					8	0.44
					9	0.42
					10	0.40

I_n – номинальный ток аппарата, А; k_l – коэффициент загрузки; ϑ_c – температура контактных площадок; θ_c – допустимый перепад температуры контакта над температурой окружающей среды, $\theta_c = 45$ °С; ρ – удельное электрическое сопротивление, для меди $\rho = 1.62 \cdot 10^{-8}$ Ом/м²; α – температурный коэффициент сопротивления, для меди $\alpha = 0.0043$.

Формула (27) получена для слаботочных контактов коммутационных аппаратов.

Температура контактных площадок:

$$\vartheta_к = \frac{(I_n \cdot k_l)^2 \cdot \rho + \vartheta_0 \cdot k_m \cdot f \cdot S}{k_m \cdot S \cdot f - (I_n \cdot k_l)^2 \cdot \rho \cdot \alpha}, \qquad (28)$$

где ϑ_0 – температура окружающей среды, $\vartheta_0 = 25$ °С.

Результаты расчетов приведены в таблице 6.

[10,11] Appendix 1

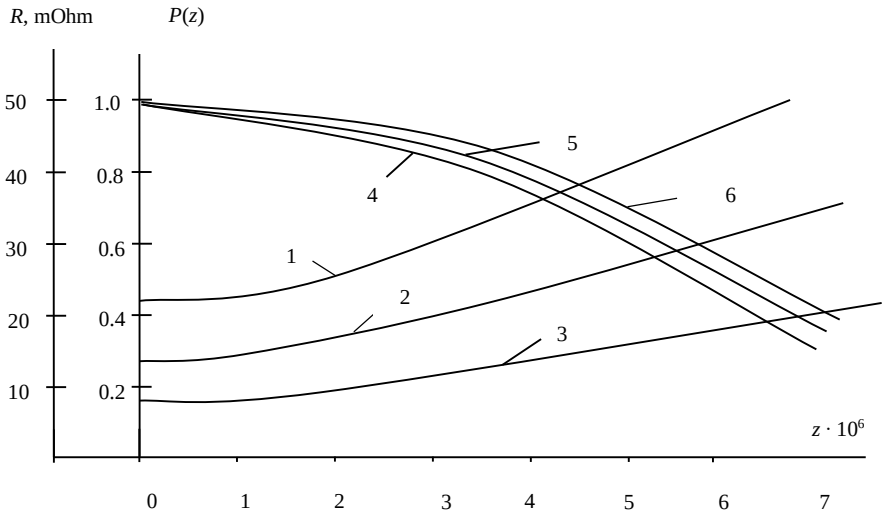

Рис. 2. Зависимость сопротивления контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов: 1 – I_n = 40 А, 2 –I_n = 63 А, 3 – I_n = 80 А; зависимость вероятности времени безотказной работы контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов: 4 – I_n = 40 А, 5 – I_n = 63 А, 6 – I_n = 80 А. [12]

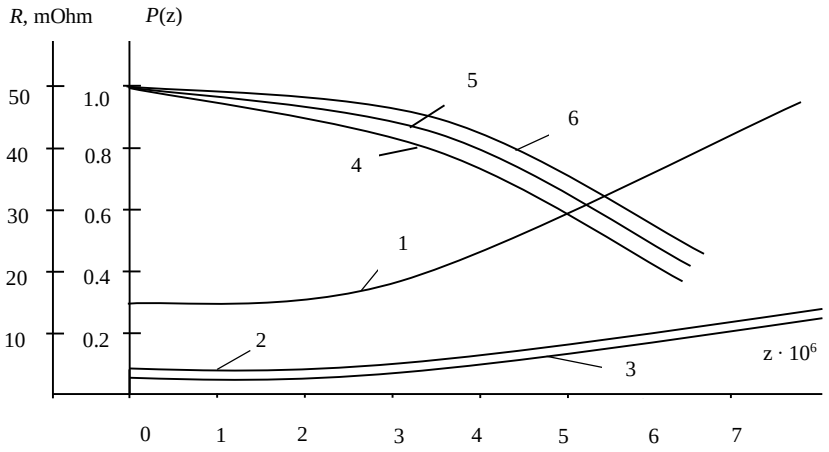

Рис. 3. Зависимость сопротивления контакторов от количества коммутационных циклов: 1 – I_n = 20 А, 2 – I_n = 63 А, 3 – I_n = 75 А; зависимость вероятности времени безотказной работы контактов контакторов от количества коммутационных циклов: 4 – I_n = 20 А, 5 – I_n = 63 А, 6 – I_n = 75 А. [13]

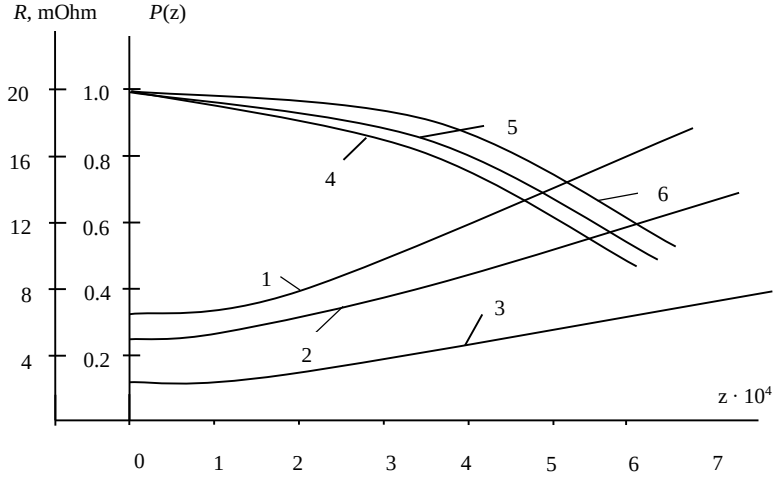

Рис. 4. Зависимость сопротивления контактов автоматических выключателей от количества коммутационных циклов: 1 –I_n = 50 А, 2 –I_n = 63 А, 3 – I_n = 100 А; зависимость безотказности контактов автоматических выключателей от количества коммутационных циклов: 4 – I_n = 50 А, 5 – I_n = 63 А, 6 – I_n = 100 А. [14]

[12,13,14] Appendix 1

Таблица 6[15]

Результаты расчета параметров контактов автоматических выключателей, контакторов и магнитных пускателей[16]

	Номинальный ток I_n А Rated current I_n А	Размеры контактов, м*10^{-3} Contact dimensions, m*10^{-3}	Температура контактов ϑ_k, °C Contact temperature ϑ_k, °C	Сопротивление контактов R_c, мОм Contact resistance R_c, mOhm
Автоматический выключатель Circuit breaker	6	c = 2.8, d = 2.8	35.2	80
		c = 2.8, d = 2.8	35.7	43
	16	c = 2.8, d = 2.8	36.8	18
	25	c = 2.8, d = 2.8	36.7	13
	32	c = 3.8, d = 38	37.9	11
	40	c = 3.8, d = 38	39.5	9
	50	c = 3.8, d = 38	42.1	8
	63	c = 3.8, d = 38	46.4	7
	100	c = 6, d = 6.2	41.8	5
	400	c = 9, d = 9.5	69.6	2
Контактор Contactor	25	c = 12, d = 16	35.0	15
	40	c = 12, d = 16	35.1	11
	250	c = 10, d = 20	38.2	4
	400	c = 17, d = 20	38.9	1.2
Магнит. пускатель Magnetic switch	4	r = 3	35.0	250
	25	r = 4	35.3	38
	40	c = 8.1, d = 8.1	35.5	27
	60	c = 12, d = 12	35.3	15

Учет сопротивлений контактов и вероятности времени безотказной работы низковольтных аппаратов позволяет оценивать техническое состояние оборудования, уточнять величину потерь электроэнергии и характеристики надежности систем электроснабжения.

ВЫВОДЫ

Благодаря проведению тепловизионных обследований получены результаты, которые позволили ввести в качестве критерия оценки технического состояния и эксплуатационной надежности низковольтных коммутационных аппаратов величину коэффициента превышения сопротивления контактных соединений аппаратов.

По результатам экспериментальных исследований обоснованы допустимые кратности превышения сопротивления контактных соединений по отношению к начальному значению сопротивлений новых аппаратов по достижению предельно допустимой температуры нагрева контактов: для автоматических выключателей в 2,9 раза; для контакторов в 3 раза; для магнитных пускателей в 3,1 раза; для рубильников в 2,3 раза; для пакетных выключателей в 2,1 раза, которые позволяют оценивать техническое состояние низковольтных коммутационных аппаратов и их эксплуатацию, не допускать развитие дефектов коммутационной аппаратуры и аварии, использовать разработанный критерий для вспомогательного регламента сроков проводимых обследований коммутационной аппаратуры.

Разработаны алгоритм и метод комплексной оценки с целью повышения эффективности функционирования низковольтных аппаратов, выявлены законы изменения вероятности времени безотказной работы и сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов низкого напряжения систем электроснабжения в зависимости от режимов эксплуатации с учетом их технического состояния.

Приведенные расчеты, согласно разработанному алгоритму, показали возможности уточнения функциональных параметров низковольтных коммутационных аппаратов – вероятности времени безотказной работы и сопротивления соединения контактов, а также управления эксплуатационными режимами систем электроснабжения.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

[1,2]**Table 1.** The temperature of the contact connections of the devices on the known serviceable sites.

[15,16] Appendix 1

[3,4]**Table 2.** Thermal imaging data.
[5]**Fig. 1.** Graphs of the resistance of the contact connections of devices on the temperature of the contact pads at K_l = 0.5 (1 —magnetic starter, I_{nom} = 63 A; 2 —circuit breaker, I_{nom} = 63 A; 3 - contactor, I_{nom} = 63 A; 4 —knife switch, I_{nom} = 63 A; 5 — packet switch, I_{nom} = 63 A).
[6,7]**Table 3.** The value of the empirical dependences of the initial resistances of the contact connections of low-voltage devices on the magnitude of the rated current.
[8,9]**Table 4.** Data for the calculation of the reliability of magnetic starters.
[10,11]**Table 5.** Dependence of the probability of the time of the failure-free operation of the contacts of magnetic actuators on the number of switching cycles.
[12]**Fig. 2.** Dependence of contact resistance of magnetic starters on the number of switching cycles: 1 — In = 40 A, 2 — In = 63 A, 3 — In = 80 A; dependence of probability of time of failure-free operation of contacts of magnetic actuators on the number of switching cycles: 4 — In = 40 A, 5 — In = 63 A, 6 - In = 80 A.
[13]**Fig. 3.** Dependence of contactors resistance on the number of switching cycles: 1 — In = 20 A, 2 — In = 63 A, 3 — In = 75 A; dependence of probability of time of failure-free operation of contacts of contactors on the number of switching cycles: 4 — In = 20 A, 5 — In = 63 A, 6 — In = 75 A.
[14]**Fig. 4.** Dependence of contact resistance of circuit breakers on the number of switching cycles: 1 — In = 50 A, 2 — In = 63 A, 3 — In = 100 A; dependence of reliability of contacts of automatic switches on the number of switching cycles: 4 — In = 50 A, 5 — In = 63 A, 6 — In = 100 A.
[15.16]**Table 6.** The results of the calculation of the contacts' parameters of the circuit breakers, contactors and magnetic starters.

Литература (References)

[1] Short T. A. *Electric Power Distribution Equipment and Systems*. Boca Raton, 2018. 344 p.
[2] Tseng M.L., Lin R.J., Tan K., Geng Y., Lim M. *Benchmarking eco-efficiency in green supply chain practices in uncertainty*. Prod. Plan. Control. 2014, no. 25, pp. 1079–1090.
[3] Brown R.E. *Electric Power Distribution Reliability*. Boca Raton, 2017. 504 p.
[4] Choi U.M., Blaabjerg F., Iannuzzo F. *Junction temperature estimation method for a 600V, 30A IGBT module during converter operation.* Microelectron. Reliab. 2015, no. 55, pp. 2022–2026.
[5] Astigarraga D., Ibanez F.M., Galarza A. *Analysis of the Results of Accelerated Aging Tests in Insulated Gate Bipolar Transistors*. IEEE Trans. Power Electron. 2016, no. 31, pp. 7953–7962.
[6] Grill P. *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*. Boca Raton, 2016. 1000 p.
[7] Shin D., Golosnoy I.O., McBride J.W. *Advanced Aircraft Power Electronics Systems the impact of simulation, standards and wide band-gap devices*. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2018. pp. 1-8.
[8] Alghassi, A.; Perinpanayagam, S.; Samie, M. Stochastic RUL calculation enhanced with TDNN-based IGBT failure modeling. *IEEE Trans. Reliab*. 2016, no. 65, pp. 558–573.
[9] Bo T., Wei Q., Ze W. *Monitoring IGBT's Health Condition via Junction Temperature Variations*. In Proceedings of the 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition—APEC 2014, Fort Worth, TX, USA, 16–20 March 2014; pp. 2550–2555.
[10] Vega A.R.D., Ghimire P., Pedersen K.B. *Test setup for accelerated test of high power IGBT modules with online monitoring of Vce and Vf voltage during converter operation*. In Proceedings of the 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014—ECCE ASIA), Hiroshima, Japan, 18–21 May 2014; pp. 2547–2553.
[11] Hu Z., Du M.,Wei K. *Real-time monitoring solder fatigue for IGBT modules using case temperatures*. HKIE Trans. 2017, no. 24, pp. 141–150.
[12] H. R. Esmaeilian, Fadaeinedjad R. *Energy Loss Minimization in Distribution Systems Utilizing an Enhanced Reconfiguration Method Integrating Distributed Generation*. IEEE Syst. J., IEEE. 2014. pp. 1-10.
[13] Shaodi H., Li X. Early warning of electric equipment current-carrying fault based on equivalent resistance analysis. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, vol. 34, no. 3, pp. 541-546.
[14] Liu B-Y., Wang G-S., Tseng M-L., Wu K-J. *Exploring the Electro-Thermal Parameters of Reliable Power Modules*: Insulated Gate Bipolar Transistor Junction and Case Temperature, no. 25, pp. 329-334.
[15] Ma K., Bahman A., Beczkowski S.S. *Complete loss and thermal model of power semiconductors including device rating information*. IEEE Trans. Power Electron. 2015, no. 30, pp. 2556–2569.
[16] Gheorghita C.M., Adam M. *About contact resistance of the electrical equipment*. 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, 2017, pp. 298-301.
[17] Gupta R., Sharp J., Mccarty R. Practical contact resistance measurement method for bulk Bi2te3-based thermoelectric devices. *Journal of Electronic Materials*, 2013, vol. 43, no. 6, pp. 457-462. doi: 10.1007/s11664-013-2806-6.
[18] Assael, M. J. *A Novel Portable Absolute Transient Hot-Wire Instrument for the Measurement of the Thermal Conductivity of Solids*. Int. J. Thermophys, 2015, 36, pp.c 3083–3105.
[19] Souza R.T., Costa E.G. *Characterization of contacts degradation in circuit breakers through the dynamic contact resistance*, Transmission & Distribution Conference and Exposition. Latin America (PES T&D-LA). Medellin, 2014, pp. 367-370.

[20] He X., Guo A. *A traction three-phase to single-phase cascade converter substation in an advanced traction power supply system*. Energies, 2015, vol. 8, no. 9, pp. 9915–9929.
[21] *GOST 12393-2013. Armatura kontaktnoy seti zheleznoy dorogi lineynaya. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* [State Standard 12393-2013. Line fittings for overhead system of railways. General common requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p.
[22] *RD 34.45-51.300-97. The scope and standards of electrical testing* [RD 34.45-51.300-97Ob"yem i normy ispytaniy elektrooborudovaniya]. Moscow, SC ENAS, 2004. 256 p.
[23] *GOST R 50030.4.1-2012 (MEK 60947-4-1:2009) Apparatura raspredeleniya i upravleniya nizkovol'tnaya. Chast' 4. Kontaktory i puskateli. Razdel 1. Elektromekhanicheskiye kontaktory i puskateli*. [State Standard 50030.4.1-2012. IEC 60947-4-1: 2009. Low-voltage switchgear and controlgear. Part 4. Contactors and motor-starters. Section 1. Electromechanical contactors and motor-starters]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 93 p.
[24] Ryabchitsky, M. V. Nizkovol'tnyye kommutatsionnyye (silovyye) apparaty dlya nuzhd elektroenergetiki [Low-voltage switching (power) devices for the needs of electric power engineering]. *Electrical Equipment: Operation and Repair*, 2014, no. 8, p. 17-25. (In Russian).
[25] Levtsev, A.P. Problems and ways of implementing energy-saving projects that give the greatest effect. Regionology. 2015. no 3 (92). pp. 79-86. (In Russian).

Сведения об авторах.

Грачева Елена Ивановна, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Область научных интересов: эффективность функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий.
E-mail: grachieva.i@bk.ru

Ившин Игорь Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Область научных интересов: надежность, диагностика в электроэнергетике.
E-mail: ivshini@mail.ru

Горлов Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электроснабжения Юго-Западного государственного университета. Область научных интересов: Электромагнитная совместимость технических средств.
E-mail: alexjulia17@yandex.ru

Алимова Алсу Нюрхайдаровна, магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Область научных интересов: эффективность функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий.
E-mail: aan-678@rambler.ru