

[Comparative models of electric load forecasting]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 200 p.

11. Cybenko, G. Approximations by superpositions of a sigmoidal function. Mathematics of Control, Signals, and Systems, 1989, no. 2, pp. 303–314.

12. Kurbatskiy, V.G., Tomin, N.V. Prognozirovaniye elektricheskoy nagruzki s ispol'zovaniem iskusstvennykh neyronnykh setey [Forecasting of electric load using artificial neural networks]. *Elektrika*, 2006, no. 7, pp. 26–32.

13. Barskiy, A.B. *Neyronnye seti: raspoznavanie, upravlenie, prinyatie resheniy* [Neural networks: recognition, management, decision-making]. Moscow: Finansy i statistika, 2004. 176 p. (Prikladnye informatsionnye tekhnologii).

14. Borovikov, V.P. *Neyronnye seti. Statistika Neural Networks. Metodologiya i tekhnologii*

sovremennogo analiza dannykh [Neural networks. Statistica Neural Networks. Methodology and technologies of modern data analysis]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2008. 392 p.

15. Khalafyan, A.A. *STATISTICA 6. Statisticheskiy analiz dannykh* [STATISTICA 6. Statistical analysis of data]. Moscow: Binom-Press, 2007. 512 p.

16. Vedernikov, A.S., Yarygina, E.A., Khamitov, R.N. Programma «Prognozirovaniye elektropotrebleniya sobstvennykh nuzhd TETs na osnove neyronnoy seti» [Computer program «Forecasting of thermal power plant auxiliary power consumption based on neural networks»]. *Svidetel'stvo o registratsii elektronnoy resursa № 23603* [Certificate of registration of digital resource No. 23603]. Moscow: OFERNIO, 2018.

Ведерников Александр Сергеевич,

Самарский государственный технический университет,

кандидат технических наук, доцент, декан электротехнического факультета, зав. кафедрой электрических станций,

телефоны: (846) 278-44-93, 242-37-89;

e-mail: es@samgtu.ru

Vedernikov Aleksandr Sergeevich,

Samara State Technical University,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Dean of the Electrical Engineering Faculty, Head of the Electric Stations Department,

telephone: (846) 278-44-93, 242-37-89;

e-mail: es@samgtu.ru

Ярыгина Екатерина Александровна,

Самарский государственный технический университет,

аспирантка электротехнического факультета, ассистент кафедры электрических станций,

e-mail: balukova_e@mail.ru

Yarygina Ekaterina Aleksandrovna,

Samara State Technical University,

Post-Graduate Student of the Electrical Engineering Faculty, Assistant of the Electric Stations Department,

e-mail: balukova_e@mail.ru

Гофман Андрей Владимирович,

Самарский государственный технический университет,

кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций,

e-mail: gofman-av@fsk-ees.ru

Gofman Andrei Vladimirovich,

Samara State Technical University,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electric Stations Department,

e-mail: gofman-av@fsk-ees.ru

УДК 621.316.91

Сопротивление низковольтной электрической дуги для расчета коротких замыканий в расширенном диапазоне токов

Ю.П. Гусев, Е.В. Шелковой

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”»,

г. Москва, Российская Федерация

E-mail: GusevYP@mpei.ru; ShelkovoyYV@mpei.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Рост мощностей трансформаторов в низковольтных электроустановках переменного тока свыше 2500 кВА и необходимость обеспечивать быстрое отключение удаленных дуговых коротких замыканий требуют уточнения расчета сопротивления электрической дуги в области больших и малых токов. Исследования

существующего метода показывают, что диапазон токов его применения ограничен значениями от 0,65 до 42 кА, что не всегда соответствует параметрам электроустановок, для которых производится расчет. Специалисты также отмечают необходимость исключения из расчета длины дуги и учета отношения индуктивной и активной составляющих сопротивления цепи при расчете снижающего коэффициента тока. Экспериментальные исследования дуговых коротких замыканий, выполненные за рубежом, предоставляют данные в диапазоне от 20 А до 150 кА при горении дуги в различных условиях, что позволяет уточнить метод расчета сопротивления дуги в области малых и больших токов, а также исключить недостатки существующего метода.

Материалы и методы. Использованы результаты экспериментальных исследований дуговых коротких замыканий в диапазоне токов от 20 А до 150 кА при горении дуги в различных условиях. Данные экспериментов обработаны методами факторного и регрессионного анализов.

Результаты. Разработан метод расчета сопротивления электрической дуги, позволяющий выполнять расчет в диапазоне токов устойчивого дугового короткого замыкания от 80 А до 50 кА вне зависимости от значения длины дугового столба, а также рассчитывать коэффициент снижения тока с учетом отношения индуктивной и активной составляющих сопротивления цепи. Результаты применения предлагаемого метода показали удовлетворительное соответствие имеющимся экспериментальным данным и существующим методам в определенном для них диапазоне токов.

Выводы. Применение разработанного метода позволит повысить качество проектирования низковольтных электроустановок с трансформаторами мощностью свыше 2500 кВА и обеспечить мгновенное отключение удаленных дуговых коротких замыканий электромагнитным расцепителем автоматических выключателей.

Ключевые слова: сопротивление электрической дуги, короткое замыкание, вольт-амперная характеристика электрической дуги, низковольтная электроустановка

Low-voltage arc resistance for calculating short circuits in the extended current range

Yu.P. Gusev, E.V. Shelkovoy

National Research University «Moscow State Power Engineering University», Moscow, Russian Federation
E-mail: GusevYP@mpei.ru; ShelkovoyYV@mpei.ru

Abstract

Background. Transformer power growth in AC low-voltage electrical installations and the need to ensure quick disconnection of remote arcing short circuits require higher accuracy of calculating electric arc resistance in the region of high and low currents. Studies of the existing method show that the range of currents it can be applied to is limited to the values from 0,65 kA to 42 kA, which does not always correspond to the parameters of electrical installations for which the calculation is made. Experts also note the need to exclude the arc length from the calculation and to take into account the ratio of the circuit resistance inductive and active components when calculating the current reduction factor. Experimental studies of arcing short circuits conducted abroad contain data for the range from 20 A to 150 kA for arc burning in various conditions, which makes it possible to increase the accuracy of calculating arc resistance in the region of small and large currents and to improve the existing methods.

Materials and methods. We used the results of experimental studies of arcing short circuits in the range from 20 A to 105 kA for arc burning in different conditions. The experimental data were processed by methods of factor and regression analyzes.

Results. We have developed a method for calculating electric arc resistance, which allows calculations in the range of stable arcing short circuits from 80 A to 50 kA without taking into account the arc length, and also calculation of the current reduction coefficient taking into account the ratio of circuit resistance inductive and active components. The results of applying the proposed method have shown satisfactory agreement with the available experimental data and existing methods in the range of currents determined for them.

Conclusions. The application of the developed method will allow improving the design quality of low-voltage electrical installations with over 2500 kVA transformers and ensuring the instantaneous disconnection of remote arcing short circuits with an electromagnetic release of circuit breakers.

Key words: electric arc resistance; short circuit; current-voltage characteristic of electric arc; low-voltage electric installations

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.6.038-047

Введение. Расчет коротких замыканий (КЗ) в низковольтных электроустановках переменного тока выполняется в целях выбора электрооборудования и параметров срабатывания отключающих защитных аппаратов. Большинство КЗ являются дуговыми. Точность расчета дуговых КЗ главным образом зависит от способа учета электрической дуги в месте КЗ.

ГОСТ 28249–93⁴ допускает использование нескольких способов учета сопротивления дугового столба. Их анализ в [1] показал, что ток дугового КЗ в области малых токов (до 1 кА)

⁴ ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – Введ. 1995-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 58 с.

оказывается завышенным, а в области больших токов (свыше 40 кА) заниженным. Это снижает точность расчета дуговых КЗ за трансформаторами мощностью свыше 2500 кВА и приводит к ошибкам при выборе защитной характеристики автоматических выключателей и не выполнению требования п.1.7.79 ПУЭ по предельному времени отключения КЗ. Разброс результатов расчета токов дуговых КЗ по ГОСТ может составлять 30–40 %.

Такой большой разброс обусловлен недостатками предлагаемых ГОСТом способами учета дуги. Способ снижающего коэффициента K_c не позволяет определить сопротивление дугового столба, а формулу расчета сопротивления дуги из ГОСТ сложно применять, поскольку в ней используется длина дуги, реальное значение которой неизвестно. Как указано в [2], при расчете КЗ в одной и той же цепи можно получить существенно различные результаты, зависящие от принятого проектировщиком расчетного значения длины дуги, что позволяет обосновывать ошибочные проектные решения, способные привести в конечном итоге к серьезным авариям и пожарам.

При расчете снижающего коэффициента K_c также не учитывается влияние отношения X_k/R_k в короткозамкнутой цепи, хотя, как можно видеть на рис. 1, не учет данного фактора при КЗ, близких к источнику энергии (в области больших токов), может обуславливать погрешность в расчете более 20 %.

Расчет для рис. 1 выполнен для области применения способа снижающего коэффициента K_c , которая ограничена мощностью трансформатора $S_{T,ном} = 1000$ кВ·А. С увеличением мощности трансформатора более 1000 кВ·А погрешность расчета тока дугового КЗ возрастает и за трансформатором мощностью 5000–6300 кВА может составлять 40–60 %.

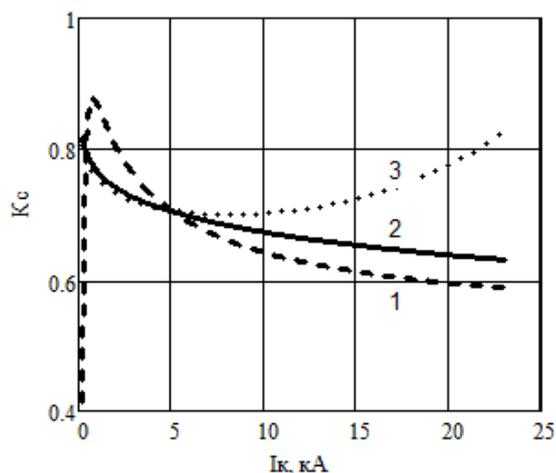


Рис. 1. Результаты расчета коэффициента снижения тока K_c по ГОСТ 28249-93: 1 – по формуле расчета K_c ; 2 – по формуле расчета R_d при $X_k/R_k = \text{const}$; 3 – по формуле расчета R_d при $X_k/R_k = \text{var}$

На рис. 1 виден еще один недостаток способа снижающего коэффициента K_c : коэффициент K_c не рассчитывается в области токов меньше 1 кА (кривая 1 идет резко вниз). Это обусловлено областью применения способа снижающего коэффициента K_c , который применим только для расчета токов КЗ в диапазоне токов металлического КЗ свыше 1,2 кА и отношения X_k/R_k от 0,6 до 3. Графически продленная кривая K_c (I_k) в область токов менее 1 кА дает погрешность в расчете тока КЗ 20–25 %.

Расчет сопротивления дугового столба по ГОСТ в области малых и больших токов также ограничен. Он не применим для токов менее 0,65 кА и за трансформаторами мощностью более 2500 кВА.

Необходимость повышения точности расчета сопротивления дуги отмечается многими специалистами, поскольку сопротивление дуги является важным параметром, вносит большой вклад в активную составляющую полного сопротивления цепи КЗ и необходимо для корректного применения метода симметричных составляющих при расчете несимметричных КЗ и комплексного учета влияющих на ток КЗ факторов (тепловой спад, влияние двигательной нагрузки и др.).

Ниже предложен метод расчета сопротивления дугового столба для расширенного диапазона токов.

Методы исследования. Для исследования были собраны и систематизированы экспериментальные данные о дуговых КЗ, полученные как в лабораторных условиях, так и в действующих низковольтных электроустановках. В табл. 1 представлены известные источники экспериментальных данных о дуговых КЗ.

Условия проведения экспериментов приведены в табл. 2. Эксперименты выполнялись в электроустановках номинальным напряжением 0,22–0,66 кВ, в области токов металлического КЗ от 20 А до 150 кА, отношение X_k/R_k в цепи металлического КЗ варьировалось от 0,5 до 40, расстояние между электродами, на которых зажигалась дуга, изменялось от 5 до 250 мм. Выполнялись опыты как при симметричных, так и при несимметричных КЗ в условиях горения дуги в закрытом пространстве (кабельные лотки, вводные коробки электродвигателей, распределительные щиты) и на открытых проводниках (сборные шины, лабораторные электроды).

Анализ результатов экспериментов показал, что устойчивые дуговые КЗ возникают в закрытом пространстве при расстоянии между электродами не более 10 см и отношении X_k/R_k не менее 0,5. Значение тока через дугу при устойчивом КЗ составляет не менее 80 А. При иных условиях возникают самопогасающие или прерывистые дуговые КЗ.

Таблица 1. Источники экспериментальных данных о дуговых КЗ и способы учета дуги на их основе

Источник данных	Способ учета дуги*	Страна	Год
М.А. Шиша [2],	коэффициент снижения $K_C(Z_K)$	Россия	1995
L.E. Fisher [3]	сопротивление дуги $R_d(L_d, I_d)$	США	1970
Ю.П. Гусев [4]	сопротивление дуги $R_d(I_d)$	Россия	2005
IEEE 1584**	коэффициент снижения $K_C(I_K, a, U_{НОМ})$	США	2002
R. Wilkins [5]	сопротивление дуги $R_d(I_d, a, U_{НОМ})$	США	2004
A.D. Stokes [6]	сопротивление дуги $R_d(I_d, a)$	Австралия	1991
H. Shau [7]	коэффициент снижения $K_C(a, R_K/X_K)$	Германия	2008
Hydro-Quebec [8]	коэффициент $K_C(I_K, a, U_d, R_K/X_K, U_{НОМ})$	Канада	2008
V.P. Ignatko [9]	сопротивление $R_d(I_d, a)$	Польша	1977
J. Poukert [10]	сопротивление $R_d(I_d, a)$	Польша	1993

* Z_K – полное сопротивление цепи металлического КЗ; I_d – ток через дугу; I_K – ток металлического КЗ; a – расстояние между электродами, на которых горит дуга; $U_{НОМ}$ – номинальное напряжение электроустановки, U_d – напряжение на дуге.

** IEEE 1584-2002 Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. – USA, 2002.

Таблица 2. Условия экспериментов дуговых КЗ

Источник данных	$U_{НОМ}$, кВ	I_K , кА	X_K/R_K	a , мм	Вид КЗ	Место КЗ
М.А. Шиша, Ю.П. Гусев	0,4	1,2–18,4	0,6–3,0	5–100	$I_K^{(1),(2),(3)}$	Статистические данные по дуговому КЗ в сети собственных нужд электростанций и подстанций
L.E. Fisher	0,278–0,480	0,65–41,6	4,4–12,6	13–89	$I_K^{(1)}$	Закрытая дуга, шины, корпуса щитков
IEEE 1584. –2002, Wilkins	0,4–0,6	0,7–106	0,6–40	7–152	$I_K^{(1),(2),(3)}$	Шины, электроды
A.D. Stokes, W.T. Oppenlander	0,240–0,415	0,02–14	–	5–250	–	Открытая дуга между медными стержневыми электродами
H. Schau	0,38; 0,69	3–100	–	до 250	$I_K^{(3)}$	Шины
Hydro-Quebec	0,347	1–30	0,5–30	25–100	$I_K^{(1),(2),(3)}$	Кабель, шины, электроды (стержень, пластины)
V.P. Ignatko, J. Poukert	0,4–0,6	0,3–150	–	1–200	$I_K^{(1),(2),(3)}$	Шины

При устойчивом дуговом КЗ длина дуги практически не изменяется во времени и равна междупазному расстоянию. В низковольтных электроустановках в качестве закрытого места КЗ могут быть кабельный лоток, распределительные коробки электродвигателей, шинопроводы, щитки вторичных сборок, распределительные щиты.

По данным североамериканского стандарта IEEE 1584-2002, средняя длина дуги в кабеле составляет 13 мм, в электрощитах и шинопроводе – 25–40 мм. В соответствии с [10], среднее значение длины дуги в кабеле и шинопроводе в низковольтной электроустановке составляет также порядка 13 и 40 мм соответственно.

В соответствии с ПУЭ в распределительных щитах (ЩСН, РУ НН, ГРЩ, ВРУ) расстояния между проводящими частями должны быть не менее 20 мм по поверхности изоляции и 12 мм по воздуху, а от шин до корпуса щита – 40 мм. В зарубежной практике расчета дуговых КЗ [13] типовая длина дуги на головном участке электроустановки составляет 3 дюйма (76,2 мм), в распределительных щитках – 2 дюйма (50,8 мм), вблизи конечного потребителя – 0,5 дюйма (12,7 мм).

Таким образом, для расчета устойчивых дуговых КЗ можно принять типовые значения длины дуги, равные расстоянию между проводниками, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Значение длины дуги для расчета устойчивых дуговых КЗ

Место КЗ	Длина дуги, мм
Кабель	13
Распределительный щиток	25
НКУ	40

На основе вышеуказанных экспериментальных данных были построены вольт-амперные характеристики (ВАХ) электрической дуги в виде зависимостей действующих значений напряжения на дуге от тока через дугу. Использовались данные об устойчивых дуговых КЗ в кабеле, в распределительных щитках и головных щитах низковольтной электроустановки.

В связи с тем, что экспериментальных данных для построения ВАХ дуги при КЗ в кабеле было недостаточно, выполнялось моделирование устойчивых дуговых КЗ в кабеле с органической и полимерной изоляцией, результаты которого представлены в [11].

Результаты исследования. В результате расчетов были получены три ВАХ, соответствующие каждой расчетной длине дуги (рис. 2).

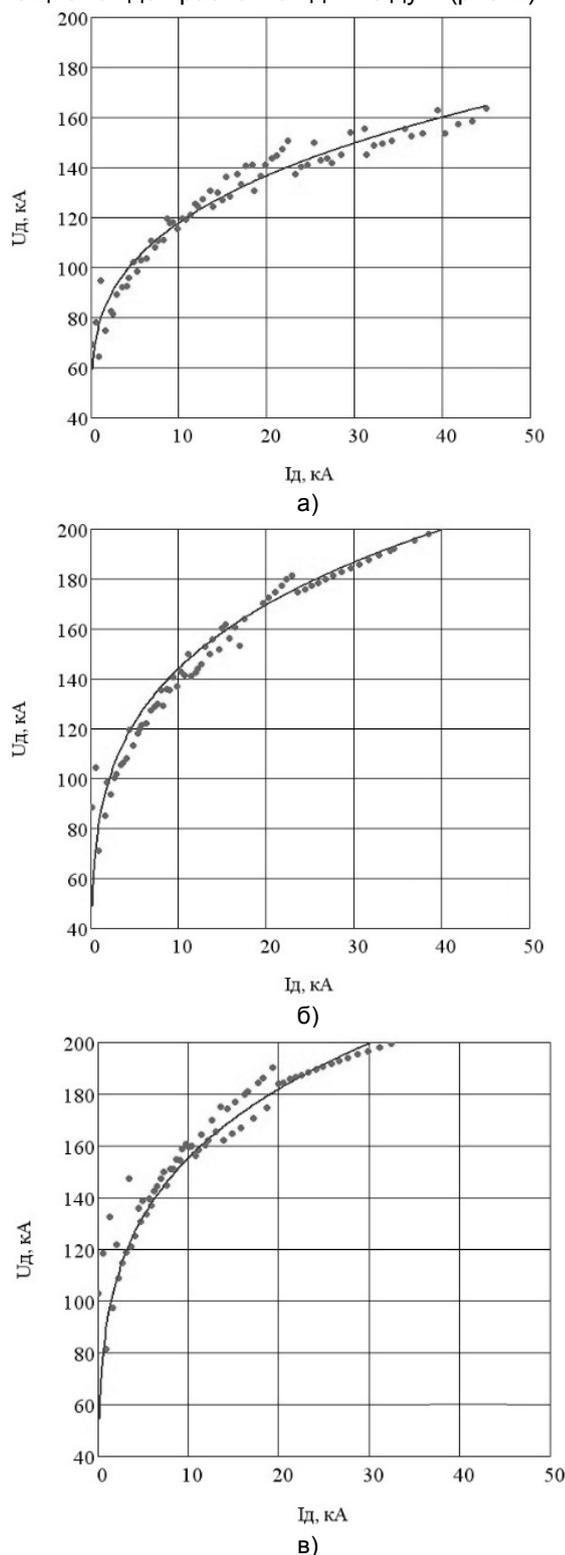


Рис. 2. ВАХ электрической дуги при устойчивом КЗ: а – в кабеле; б – в распределительном щитке; в – в НКУ на головном участке

Регрессионные функции полученных ВАХ, В, имеют следующий вид:

– для КЗ в кабеле:

$$U_d = 76 \cdot I_d^{0,2}; \quad (1)$$

– для КЗ в распределительном щитке:

$$U_d = 84 \cdot I_d^{0,24}; \quad (2)$$

– для КЗ в НКУ на головном участке электроустановки:

$$U_d = 92 \cdot I_d^{0,23}; \quad (3)$$

где I_d – действующее значение тока через дугу, кА.

На основе уравнений (1)–(3) была получена усредненная ВАХ электрической дуги, В:

$$U_d = 78 \cdot I_d^{0,24}. \quad (4)$$

Исходя из формулы (4) сопротивление дуги, мОм, можно рассчитать по формуле

$$R_d = \frac{78}{I_d^{0,76}}. \quad (5)$$

Снижающий коэффициент K_c можно рассчитать по формуле

$$K_c = 0,9 \left(\frac{X_k}{R_k} \right)^{0,086} - 0,15 \cdot I_k^{0,31}. \quad (6)$$

Формула (5) позволяет рассчитывать сопротивление электрической дуги вне зависимости от значения ее длины, а формула (6) позволяет учитывать отношение X_k/R_k в цепи КЗ при расчете K_c .

Сопоставление усредненной ВАХ с экспериментальными ВАХ представлено на рис. 3. На рис. 4 показано сопоставление функций изменения сопротивления дуги от тока через дугу по усредненной и экспериментальным ВАХ.

Анализ полученных зависимостей (рис. 3, 4) показывает, что разработанная усредненная ВАХ электрической дуги в наибольшей степени соответствует экспериментальной кривой Фишера, но с некоторыми различиями: в области малых токов токоограничивающее действие дуги по усредненной ВАХ выражено слабее, чем по кривой Фишера, и более сопоставимо с кривыми М.А. Шиша и IEEE 1584-2002; в области больших токов значение напряжения на дуге по усредненной ВАХ несколько больше значения по кривой Фишера. Это обусловлено, в том числе, учетом характеристик электрической дуги при КЗ в кабеле, данные о которых отсутствуют в экспериментах Фишера.

Верификация усредненной ВАХ. Для верификации усредненной ВАХ использовались экспериментальные данные, положенные в основу стандартов:

1. ГОСТ 28249–93 (L.E. Fisher [3], М.А. Шиша [2]);

2. ANSI/IEEE Standard 242–1986 и NEMA Standard Publication PB 2.2–1988 (H.I. Stanback [12]);

3. IEEE 1584-2002.

Рассматривались устойчивые установившиеся дуговые КЗ.

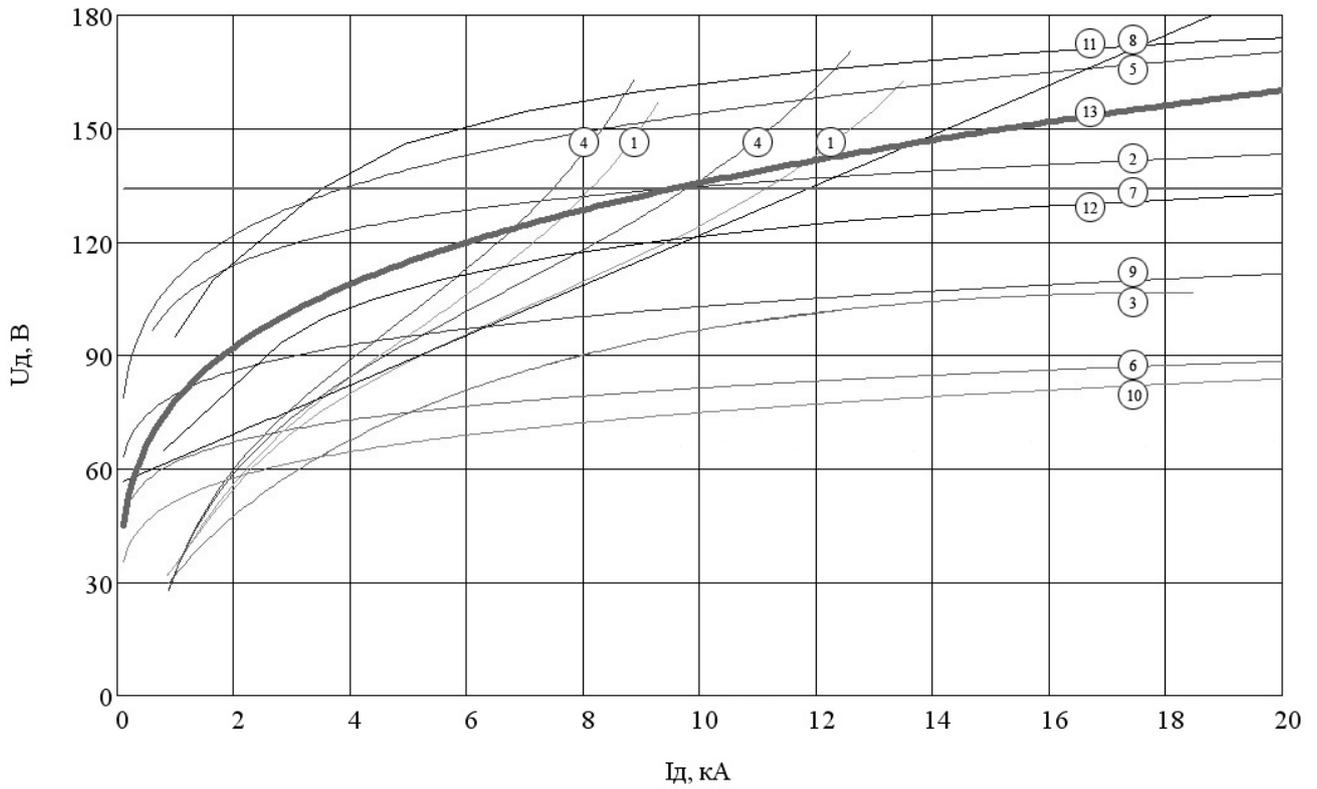


Рис. 3. Сопоставление усредненной ВАХ (13) дуги с экспериментальными ВАХ по данным: 1 – М.А. Шиша ($S_{т.ном} = 630 \text{ кВА}; 1000 \text{ кВА}$); 2 – L.E. Fisher; 3 – Ю.П. Гусев; 4 – IEEE 1584-2002 ($S_{т.ном} = 630 \text{ кВА}; 1000 \text{ кВА}$); 5 – R. Wilkins; 6 – A.D. Stokes, W.T. Oppenlander; 7 – H. Schau; 8 – Hydro-Quebec; 9 – V.P. Ignatko; 10 – J. Poukert; 11 – моделирование КЗ в кабеле с полимерной изоляцией; 12 – моделирование КЗ в кабеле с органической изоляцией

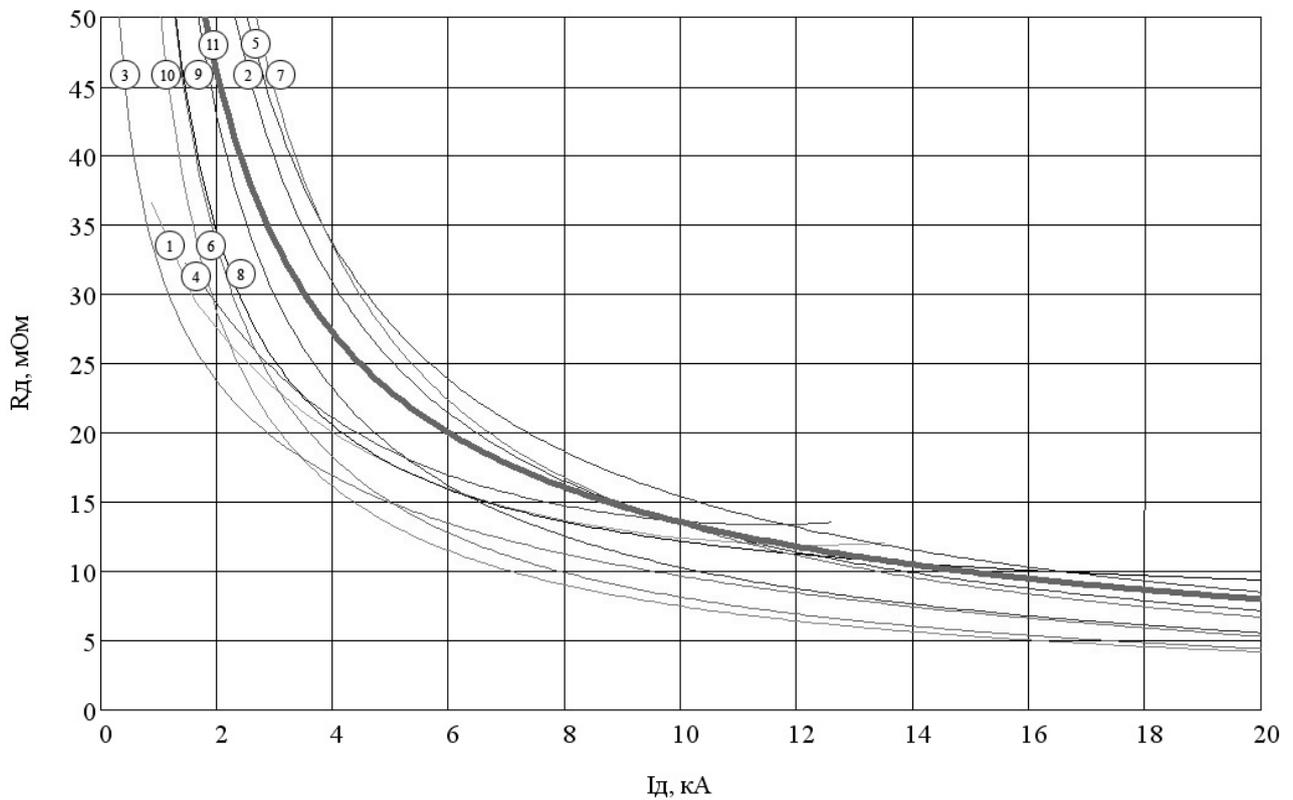


Рис. 4. Изменение сопротивления дуги от тока через дугу для усредненной (11) и экспериментальных ВАХ по данным: 1 – М.А. Шиша ($S_{т.ном} = 630 \text{ кВА}$); 2 – L.E. Fisher; 3 – Ю.П. Гусев; 4 – IEEE 1584-2002; 5 – R. Wilkins; 6 – A.D. Stokes, W.T. Oppenlander; 7 – H. Schau; 8 – Hydro-Quebec; 9 – V.P. Ignatko; 10 – J. Poukert

Погрешность действующего значения тока дугового КЗ, полученного с использованием усредненной ВАХ, относительно экспериментальных данных рассчитывалась по формуле

$$\delta = \frac{I_{д.экс} - I_{д.ВАХ}}{I_{д.экс}} \cdot 100 \%$$

Погрешность рассчитывалась для каждого опыта устойчивого дугового КЗ: по данным Stanback – для 24 опытов, по данным Фишера – для 10 опытов, по данным IEEE 1584-2002 – для 34 опытов.

Среднее значение погрешности для серии опытов рассчитывалось по следующей формуле:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^N |\delta_i|}{N}$$

где N – количество опытов в серии.

Также выполнялось сопоставление регрессионных функций, построенных по результатам экспериментов и по усредненной ВАХ в виде полинома второго порядка с помощью функций *regress* и *interp* в программе *Mathcad*, как зависимость коэффициента снижения K_c от тока металлического КЗ. Сопоставление регрессионных функций представлено на рис. 5.

Результаты верификации представлены в табл. 4.

Максимальная погрешность получена относительно опытов для стандарта IEEE 1584-2002, ее величина составила 24,4 %. Относительно других экспериментальных данных погрешность оказалась около 10 %.

Большое значение погрешности для данных IEEE 1584-2002 обусловлено большим количеством опытов в данной серии с отношением X_k/R_k , равным 30–40, что в 3–3,5 раза превышает максимальное возможное X_k/R_k в реальных низковольтных электроустановках.

Сопоставление по регрессионным функциям снижающего коэффициента K_c дало удовлетворительное отклонение в отношении всех экспериментальных данных.

Сопоставление результатов расчета сопротивления дуги и тока дугового КЗ по формуле (5) с результатами расчета по ГОСТ 28249–93 представлено на рис. 6, 7 соответственно. Расчет выполнялся при трехфазном КЗ на стороне 0,4 кВ трансформатора номинальной мощностью $S_{ном} = 1000$ кВ·А для разной удаленности точки КЗ, которая задавалась кабелем различной длины с алюминиевыми жилами различного сечения.

Таблица 4. Результаты верификации усредненной ВАХ

Экспериментальные данные, год	Количество опытов, шт.	$U_{ном}, В$	$a, мм$	$I_k, кА$	$\cos \varphi_k$	$\delta I_d, \%$	$\Delta K_c \max$
L.E. Fisher, 1970	10	480	12,7–102	0,65–41,6	0,08–0,44	10,7	0,10
H.I. Stanback, 1977	24	480	25–102	5,151–36,1	0,09–0,16	8,6	0,06
IEEE 1584-2002	34	250–610	7,1–40	0,7–106	0,03–0,86	24,4	0,09

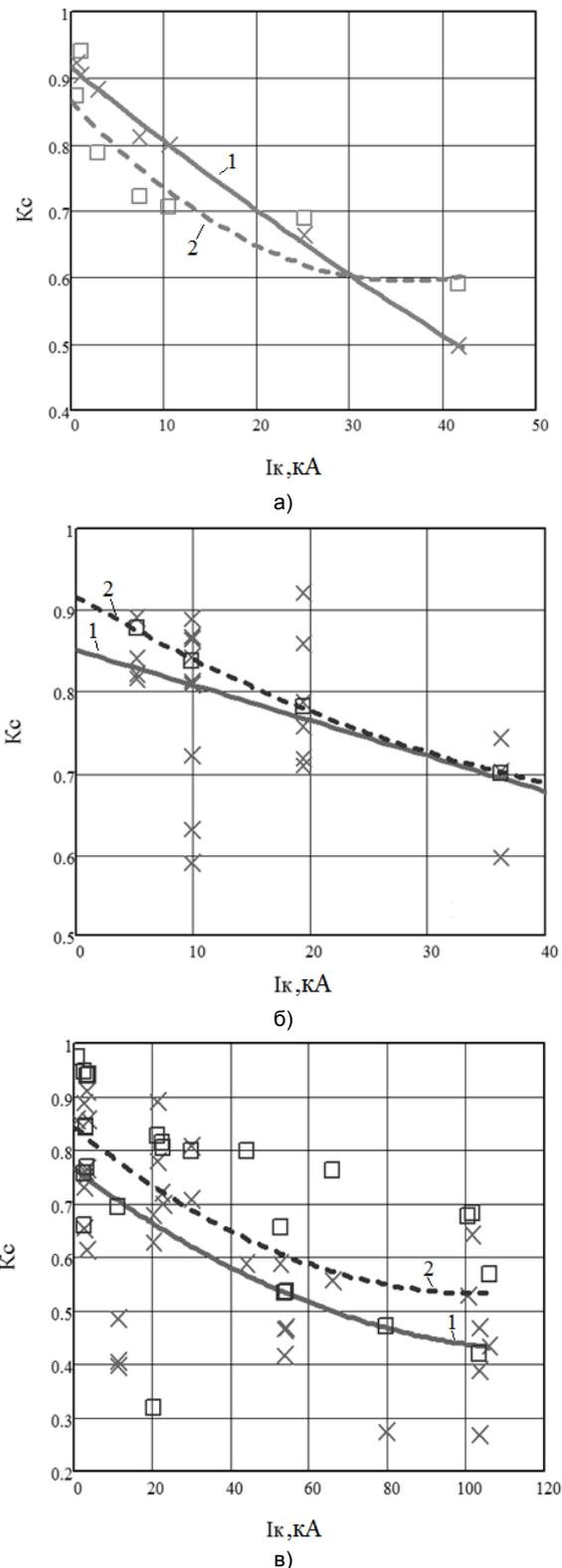


Рис. 5. Сопоставление результатов расчета коэффициента K_c по усредненной ВАХ (1) и опытным данным (2) по регрессионным функциям: а – Fisher L.E.; б – Stanback H.I.; в – IEEE 1584

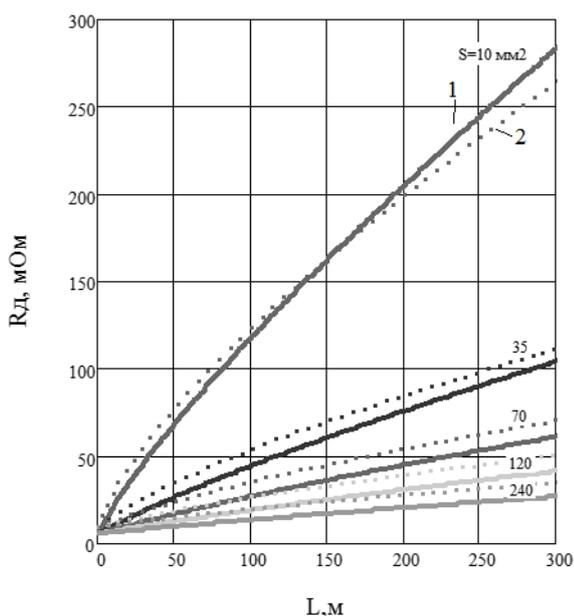


Рис. 6. Сопротивление электрической дуги при трехфазном КЗ на стороне 0,4 кВ трансформатора 1000 кВА: 1 – по ГОСТ 28249–93; 2 – по формуле (5)

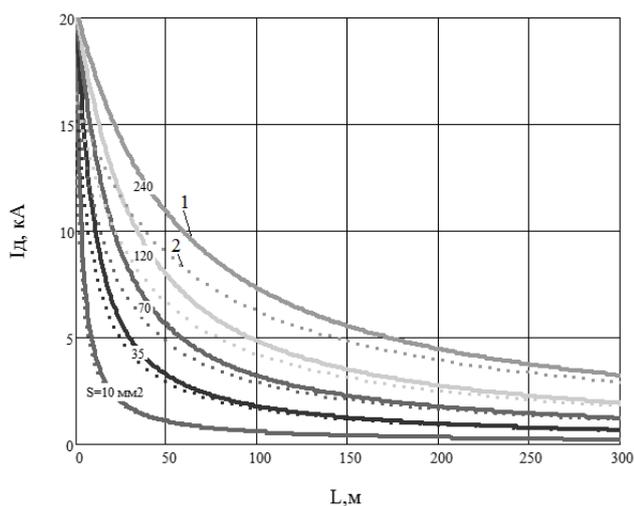


Рис. 7. Ток дугового КЗ при трехфазном КЗ на стороне 0,4 кВ трансформатора 1000 кВА: 1 – по ГОСТ 28249–93; 2 – по формуле (5)

Анализ полученных зависимостей (рис. 6, 7) показывает, что различие в результатах расчета увеличивается с увеличением сечения жилы кабеля и приближением точки КЗ к обмоткам питающего трансформатора. То есть в области больших токов КЗ значение сопротивления дуги, рассчитанное на основе усредненной ВАХ, несколько больше значения, рассчитанного по методу из ГОСТ. Соответственно, значения тока дугового КЗ получаются меньше значений, полученных по ГОСТ. Данные различия можно объяснить тем, что, в отличие от усредненной ВАХ, способы ГОСТ не учитывают особенности дугового КЗ в кабелях, при котором токоограничивающее действие электрической дуги выражено сильнее, чем при КЗ на ошиновке, за счет повышения напряжения на

дуге под воздействием газов, выделяемых изоляцией кабелей. Результаты расчета тока дугового КЗ в области малых токов практически идентичны.

Применение формулы (6) для расчета коэффициента снижения K_c дает практически полное совпадение с расчетом по ГОСТ 28249–93 для установившегося КЗ (рис. 8). Для сопоставления зависимость $K_c(Z_k)$ из ГОСТ была пересчитана в виде зависимости $K_c(I_k)$. Различие результатов в области малых токов можно допустить, поскольку оно идет в запас надежности при проверке чувствительности токовых защит.

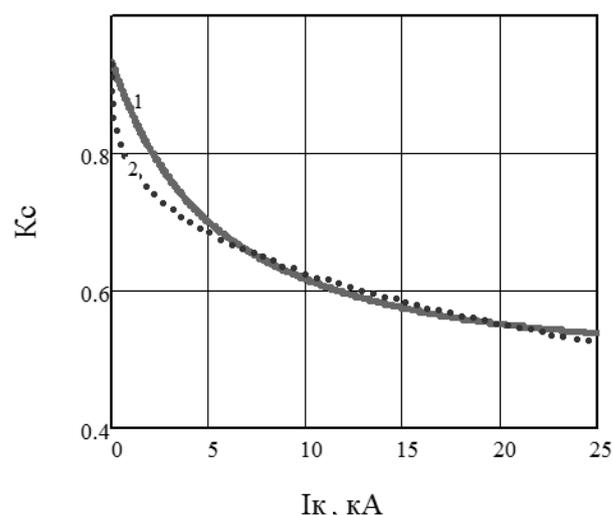


Рис. 8 Зависимость коэффициента K_c от тока металлического КЗ I_k : 1 – по ГОСТ 28249–93; 2 – по формуле (6)

Выводы. Применение разработанного метода расчета сопротивления электрической дуги позволяет выполнять расчет в более широком диапазоне значений тока по сравнению с ГОСТ 28249–93 и исключить из расчета трудноопределимое значение длины электрической дуги. Это позволит повысить качество проектирования низковольтных электроустановок с трансформаторами мощностью свыше 2500 кВА и обеспечить выполнение требования ПУЭ по времени отключения удаленных дуговых КЗ путем правильного выбора кратности срабатывания электромагнитного расцепителя автоматических выключателей.

ГОСТ 28249–93 рекомендуется переработать, оставив один способ расчета сопротивления электрической дуги из трех, имеющих в действующем стандарте. Это позволит гармонизировать отечественный стандарт с зарубежными стандартами и выбрать электрооборудование низковольтных электроустановок переменного тока, а также их защиту от КЗ единообразно всеми проектными организациями.

Список литературы

1. **Гусев Ю.П., Гусев О.Ю., Шелковой Е.В.** Анализ методов расчета дуговых коротких замыканий в электроустановках переменного тока напряжением до 1000 В // Энергоэксперт. – 2016. – № 3. – С. 44–48.
2. **Шиша М.А.** Учет влияния электрической дуги на ток КЗ в сетях напряжением до 1 кВ переменного и постоянного тока // Электрические станции. – 1996. – № 11. – С. 49–55.
3. **Fisher L.E.** Resistance of Low-Voltage AC Arcs // IEE Transaction of Industry and General Application. – 1970. – Vol. IGA-6N6. – P. 606–616.
4. **Гусев Ю.П., Чо Г.Ч.** Разработка нормативно-технической базы проектирования и эксплуатации систем собственных нужд электростанций и подстанций нового поколения // Труды всероссийской научно-практической конференции «Энерго-2010». – М., 2010. – С. 19–22.
5. **Wilkins R., Allison M., Lang M.** Improved method for arc hazard analysis // IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. – Florida, 2004. – P. 55–62.
6. **Stokes A.D., Oppenlander W.T.** Electric Arcs in Open Air // Phys. D Appl. Phys. – 1991. – Vol. 24, № 1. – P. 26–35.
7. **Schau H., Halinka A., Winkler W.** Elektrische schutzeinrichtungen in Industrienetzen und anlagen // Hüthing & Pflaum Verlag GmbH & Co. Fachliteratur KG. – München/Heidelberg, 2008. – 270 с.
8. **Gaudreau A., Koch B.** Evaluation of LV and MV arc parameters // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23. – P. 487–492.
9. **Ignatko V.P.** Electric characteristics of AC open heavy-current arcs // 3rd International Symposium on Switching Arc Phenomena. – TU Lodz, Poland, 1977. – P. 98–102.
10. **Poukert J.** The arc voltage and the resistance of LV fault arcs // 7th International Symposium on Switching Arc Phenomena. – TU Lodz, Poland, 1993. – P. 49–51.
11. **Усикхин В.Н.** Об оценке сопротивления электрической дуги при расчетах короткого замыкания в сетях напряжением до 1000 В // Электрические станции. – 1994. – № 7. – С. 55–57.
12. **Гусев Ю.П., Шелковой Е.В.** Моделирование дуговых коротких замыканий в электроустановках напряжением до 1000 В // Электричество. – 2016. – № 10. – С. 22–28.
13. **Stanback H.I.** Predicting Damage from 277 Volt Single Phase to Ground Arcing Faults // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1977. – Vol. IA-13, № 4. – P. 307–314.
14. **Matthews J., Gammon T.** The Application of a Current-Dependent Arc Model to Arcing at a Main Distribution Panel, a Sub-Panel and a Branch Circuit // IEEE Proc. Southeast Conf. – 2001. – P. 72–78.
15. installations with the voltage of up to 1000 V]. *Energoekspert*, 2016, no. 3, pp. 44–48.
16. Shisha, M.A. Uchet vliyaniya elektricheskoy dugi na tok KZ v setyakh napryazheniem do 1 kV peremennogo i postoyannogo toka [Accounting for the influence of an electric arc on short-circuit current in ac and dc networks with the voltage of up to 1 kV]. *Elektricheskie stantsii*, 1996, no. 11, pp. 49–55.
17. Fisher, L.E. Resistance of Low-Voltage AC Arcs. IEE Transaction of Industry and General Application, 1970, vol. IGA-6N6, pp. 606–616.
18. Gusev, Yu.P., Cho, G.Ch. Razrabotka normativno-tehnicheskoy bazy proektirovaniya i ekspluatatsii sistem sobstvennykh nuzhd elektrostantsiy i podstantsiy novogo pokoleniya [Development of the regulatory and technical base for designing and operating auxiliary systems of power stations and substations of the new generation]. *Trudy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Energo-2010»* [Works of the All-Russian scientific and practical conference «Energy 2010»]. Moscow, 2010, issue 2, pp. 19–22.
19. Wilkins, R., Allison, M., Lang, M. Improved method for arc hazard analysis. IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2004, pp. 55–62.
20. Stokes, A.D., Oppenlander, W.T. Electric Arcs in Open Air. Phys. D Appl. Phys., 1991, vol. 24, no. 1, pp. 26–35.
21. Schau, H., Halinka, A., Winkler, W. Elektrische schutzeinrichtungen in Industrienetzen und anlagen. Hüthing & Pflaum Verlag GmbH & Co, Fachliteratur KG, München/Heidelberg, 2008.
22. Gaudreau, A., Koch, B. Evaluation of LV and MV arc parameters. IEEE Trans. on Power Delivery, 2008, vol. 23, pp. 487–492.
23. Ignatko, V.P. Electric characteristics of AC open heavy-current arcs. 3rd International Symposium on Switching Arc Phenomena, TU Lodz, Poland, 1977, pp. 98–102.
24. Poukert, J. The arc voltage and the resistance of LV fault arcs. 7th International Symposium on Switching Arc Phenomena, TU Lodz, Poland, 1993, pp. 49–51.
25. Usikhin, V.N. Ob otsenke soprotivleniya elektricheskoy dugi pri raschetakh korotkogo замыкания в сетях напряжением до 1000 В [On the evaluation of electric arc resistance in calculations of short circuits in networks of up to 1000 V]. *Elektricheskie stantsii*, 1994, no. 7, pp. 55–57.
26. Gusev, Yu.P., Shelkovoy, E.V. Modelirovanie dugovykh korotkikh замыканий v elektroustanovkakh napryazheniem do 1000 V [Modeling of arcing short circuits in the electrical AC network of up to 1000 V]. *Elektrichestvo*, 2016, no. 10, pp. 22–28.
27. Stanback, H.I. Predicting Damage from 277 Volt Single Phase to Ground Arcing Faults. IEEE Trans. Ind. Appl., 1977, IA-13, no. 4, pp. 307–314.
28. Matthews, J., Gammon, T. The Application of a Current-Dependent Arc Model to Arcing at a Main Distribution Panel, a Sub-Panel and a Branch Circuit. IEEE Proc. Southeast Conf., 2001, pp. 72–78.

References

1. Gusev, Yu.P., Gusev, O. Yu., Shelkovoy, E.V. Analiz metodov rascheta dugovykh korotkikh замыканий v ehlektroustanovkakh peremennogo toka napryazheniem do 1000 V [Analysis of methods for calculating arcing short circuits in a.c. electric

Гусев Юрий Павлович,
ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,
кандидат технических наук, зав. кафедрой электрических станций,
e-mail: GusevYP@mpei.ru
Gusev Yuri Pavlovich,
National Research University «Moscow State Power Engineering University»
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of the Department of Electrical Stations,
e-mail: GusevYP@mpei.ru

Шелковой Евгений Владимирович,
ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,
инженер кафедры электрических станций,
e-mail: ShelkovoyYV@mpei.ru
Shelkovoy Evgeny Vladimirovich,
National Research University «Moscow State Power Engineering University»
Engineer of the Department of Electrical Stations,
e-mail: ShelkovoyYV@mpei.ru

УДК 621.372.632

Разработка усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутривоздушной сети

А.А. Николаев, М.В. Буланов, М.Ю. Афанасьев, А.С. Денисевич
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Российская Федерация
E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Мощные электроприводы современных прокатных станков создаются на основе двигателей переменного тока среднего напряжения (асинхронных и синхронных) и преобразователей частоты с активными выпрямителями. Такие электроприводы являются источником высших гармоник, в связи с этим актуальным является вопрос об их электромагнитной совместимости с внутривоздушной распределительной сетью. В частности, данный вопрос актуален на предприятиях, в системах внутривоздушного электроснабжения которых используются протяженные кабельные линии 6–35 кВ, суммарное значение распределенной емкости в которых может достигать нескольких микрофарад. В результате взаимодействия индуктивности трансформатора главной понижающей подстанции и суммарной емкости кабельных линий в частотной характеристике сети экстремум резонанса токов может расположиться на частотах гармоник, генерируемых преобразователями частоты. В этом случае возникают сильные искажения напряжения на общих секциях распределительных устройств, что может приводить к выходам из строя электрооборудования. Существующие способы снижения негативного влияния резонансных явлений на качество электроэнергии во внутривоздушных сетях сводятся к установке специальных фильтров и требуют соответствующих экономических затрат, в связи с этим актуальной задачей является исследование альтернативных способов устранения сильных искажений, вызываемых преобразователями частоты.

Материалы и методы. Разработка усовершенствованного алгоритма ШИМ осуществляется в программном продукте MATLAB с приложением Simulink на основе созданной имитационной модели, учитывающей реальную частотную характеристику внутривоздушной сети АО «Северсталь – Сортовой завод Балаково» и параметры преобразователя частоты с активным выпрямителем.

Результаты. Разработан усовершенствованный алгоритм широтно-импульсной модуляции, адаптирующийся к резонансным явлениям во внутривоздушных сетях благодаря изменению углов включения вентилей активного выпрямителя в зависимости от нахождения экстремума частотной характеристики. Создана имитационная модель, учитывающая реальные частотные характеристики и параметры преобразователя частоты. На модели получены кривые напряжения сети при исходном и усовершенствованном алгоритме ШИМ, проведен их сравнительный анализ. Установлено, что использование адаптивного ШИМ уменьшает коэффициент суммарных гармонических искажений кривой напряжения сети в 2,5 раза.

Выводы. Достоверность полученного результата подтверждается адекватностью использованной математической модели предмету исследования, а также реальностью исходных данных для моделирования. Предложенный алгоритм ШИМ позволяет улучшать электромагнитную совместимость преобразователя частоты с сетью без применения специальных фильтрующих цепей. Полученные результаты могут применяться при проектировании преобразователей частоты с активными выпрямителями среднего напряжения.

Ключевые слова: преобразователь частоты, активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, резонанс токов, высшие гармоники