

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-492-504>

УДК 620.9

Способы токоограничения в электрических сетях до 1 кВ

А. Ю. Капустинский^{1, 2)}, С. В. Константинова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾ОДО «ЭНЭКА» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье рассмотрены и систематизированы причины возникновения высоких значений токов короткого замыкания в электрических сетях до 1кВ и указаны их негативные последствия. Приведен краткий анализ некоторых способов токоограничения (с дополнительным вложением средств и без него), позволяющих снизить негативные эффекты при протекании значительных токов короткого замыкания. Рассмотрены варианты реализации данных способов токоограничения, рекомендуемых к проработке на этапе проектирования или при замене оборудования, выработавшего свой ресурс. Указаны преимущества и недостатки описанных в статье методик ограничения токов короткого замыкания. Проанализированы варианты подключения оборудования с низким энергопотреблением в узлы электрической сети до 1кВ с высокими значениями токов короткого замыкания. Особое внимание уделено токоограничивающим аппаратам защиты, дано подробное описание конструкции некоторых из них, указаны преимущества их применения по сравнению с иными методами токоограничения, представлены соответствующие графики ограничения периодической составляющей тока короткого замыкания, ударного тока короткого замыкания и термического импульса. На основании анализа графических материалов рассмотрен вопрос обеспечения селективности защит. Изучена степень распространенности оборудования, обладающего свойством токоограничения. Приведен способ определения селективных токоограничивающих аппаратов защиты – метод энергетической селективности, представлен соответствующий график определения энергетической селективности. Описана физика процессов, позволяющих выявить степень эффективности ограничения тока короткого замыкания. Предложены варианты применения токоограничивающего оборудования.

Ключевые слова: короткое замыкание, токоограничение, автоматический выключатель, предохранитель, коэффициент токоограничения, характеристика токоограничения, токоограничивающая плавкая вставка, отключение, защита от коротких замыканий, расцепитель, энергетическая селективность, интеграл Джоуля, термический импульс

Для цитирования: Капустинский, А. Ю. Способы токоограничения в электрических сетях до 1 кВ / А. Ю. Капустинский, С. В. Константинова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 6. С. 492–504. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-492-504>

Адрес для переписки

Константинова Светлана Валерьевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
svkon2000@gmail.com

Address for correspondence

Kanstantsinava Sviatlana V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
svkon2000@gmail.com

Methods of Current Limitation in Low Voltage (up to 1 kV) Electric Networks

A. Yu. Kapustsinski^{1,2)}, S. V. Kanstantsinava¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾ALC "ENECA" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article discusses and systematizes the causes of high values of short-circuit currents in electrical networks up to 1 kV and indicates their negative consequences. A brief analysis of some current limiting methods (both with and without additional investment) is given, which makes it possible to reduce the negative effects when significant short-circuit currents occur. The variants of the implementation of these current limiting methods recommended for study at the design stage or when replacing equipment that has exhausted its resource, are considered. The advantages and disadvantages of the methods of limiting short-circuit currents described in the article are indicated. Options for connecting equipment with low power consumption to nodes of the electrical network up to 1 kV with high values of short-circuit currents are also considered. Special attention is paid to current-limiting protection devices, a detailed description of the design of some of them is given, the advantages of their use in comparison with other current-limiting methods are indicated, the corresponding graphs of the limitation of the periodic component of the short-circuit current, shock short-circuit current and thermal pulse are presented. Based on the analysis of graphic materials, the issue of ensuring the selectivity of protections is considered. The degree of prevalence of equipment with the property of current limitation is determined. A method for determining selective current-limiting protection devices is given, viz. the method of energy selectivity, the corresponding graphs for determining energy selectivity are presented. The physics allowing to determine the degree of efficiency of limiting the short-circuit current is described. Recommendations on the use of current-limiting equipment are proposed.

Keywords: short circuit, current limitation, circuit breaker, fuse, current limitation index, current limitation curve, current limitation fuse link, trip, short circuit protection, trip unit, energy based selectivity, Joule integral, thermal pulse

For citation: Kapustsinski A. Yu., Kanstantsinava S. V. (2021) Methods of Current Limitation in Low Voltage (up to 1 kV) Electric Networks. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (6), 492–504. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-492-504> (in Russian)

Введение

На шинах 0,4 кВ ТП 6/0,4 кВ и 10/0,4 кВ, а также на некоторых распределительных устройствах 0,4 кВ значение токов короткого замыкания (КЗ) часто достигает величины в несколько десятков килоампер. Одна из причин данного явления – значительный коэффициент трансформации для передачи той же величины электрической мощности на другом уровне напряжения. Высокое значение тока КЗ на рассматриваемых участках электрической сети имеет место при следующих условиях:

- высокой мощности энергосистемы в месте установки силового трансформатора;
- высокой мощности силового трансформатора (несколько сотен киловольт-ампер и выше);
- незначительной электрической удаленности распределительного устройства от шин 0,4 кВ ТП.

Наличие высокого тока КЗ приводит к существенному термическому и электродинамическому воздействию на электрооборудование, сборные шины и кабели, что, в свою очередь, требует использования дорогостояще-

го (термически и динамически более стойкого) оборудования, способного противостоять данному воздействию.

Основное удорожание схемы связано с необходимостью питания небольшой нагрузки (до 3 кВ·А при однофазной нагрузке и до 10 кВ·А при трехфазной) непосредственно от распределительного устройства 0,4 кВ ТП или в обход вводного выключателя ввиду низкой термической стойкости кабелей минимального допустимого по условию механической прочности сечения (2,5 мм²). Характерными потребителями малой мощности в данном узле энергосистемы являются, к примеру, щиты собственных нужд трансформаторных подстанций (ТП), шкафы автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), шкафы телемеханики (ТЛМ) или щиты аварийного освещения небольших помещений.

Значительное термическое и электродинамическое воздействие на электрооборудование приводит к его существенному износу.

Основная часть

Для снижения негативного воздействия при протекании большого тока КЗ применяют несколько способов токоограничения, уменьшающих вероятность деформации и разрушения оборудования, нарушения работы соседних измерительных приборов, возникновения пожара, что позволяет увеличить срок службы оборудования, снизить капитальные и дополнительные затраты на строительство объекта, применять каскадные соединения.

Наиболее простой способ снижения тока КЗ – установка силового трансформатора с повышенным значением напряжения КЗ ($U_{к\%}$). Напряжение КЗ трансформатора характеризует его полное сопротивление. Увеличение полного сопротивления подключенного последовательно элемента снижает значение тока КЗ за данным элементом. Для многих трансформаторов 10/0,4 и 6/0,4 кВ стандартные значения напряжения КЗ составляют 6 и 8 % для одного и того же типа трансформатора, производимого на одном заводе. Преимущество данного метода – отсутствие дополнительных затрат на установку оборудования, а недостатками являются увеличение потерь реактивной мощности и напряжения в трансформаторе и несколько меньшая распространенность трансформаторов с опцией выбора напряжения КЗ.

Дополнительных затрат не требует режимное токоограничение, подразумевающее запрет на включение дополнительных источников подпитки КЗ к определенным узлам диспетчерским путем или средствами автоматизации для уменьшения суммарного значения тока КЗ. К примеру, при наличии источников энергии для собственных нужд на промышленном предприятии, где преобладают потребители третьей категории по надежности электроснабжения, целесообразно подключать генерирующие источники к различным секциям и не допускать их параллельной работы при замкнутом секционном выключателе, т. е. отключать источники одной из секций в длительном ремонтном или послеаварийном режиме. Если промышленное предприятие подключено к узлу большой мощности энер-

госистемы и величина тока КЗ на выводах 6/10 кВ трансформаторов ТП имеет высокое значение, включение на параллельную работу трансформаторов может оказаться недопустимым, когда сопротивление энергосистемы гораздо меньше сопротивления трансформаторов и значение тока КЗ за трансформатором 6/0,4 кВ или 10/0,4 кВ определяется в большей степени сопротивлением трансформатора.

Однако подключение значительного числа потребителей энергии малой мощности непосредственно к сборным шинам 0,4 кВ ТП 6/0,4 кВ или 10/0,4 кВ или в обход вводного автоматического выключателя необходимо. Потребителями такого типа могут выступать собственные нужды ТП, оперативные вторичные цепи ячеек 6/10 кВ, оборудование АСКУЭ, ТЛМ и аварийное освещение. Перечисленное оборудование, за исключением аварийного освещения, необходимо подключать к сетям энергосистемы с использованием источников бесперебойного питания (ИБП). Они включаются в электрическую сеть последовательно, и ток КЗ перед входом ИБП остается неизменным, а на выходе ИБП за счет его конструкции (выпрямитель и инвертор в составе преобразователя ИБП) превышает номинальный выходной ток ИБП незначительно, обычно не более чем в 1,5–2 раза. Таким образом, подключение потребителей электроэнергии через ИБП также можно считать способом ограничения тока КЗ.

В сетях до 1 кВ для снижения величины токов КЗ возможно применение токоограничивающих реакторов, увеличивающих полное сопротивление цепи КЗ. Данный метод не имеет широкого распространения ввиду высокой стоимости токоограничивающих реакторов. Кроме того, указанное оборудование рассчитано на относительно небольшие токи (как правило, на номинальный ток до 200 А, реже до 600 А), что приводит к его децентрализованному применению и, как следствие, повышению стоимости данного технического решения. Рассматриваемый метод имеет те же недостатки, что и применение силового трансформатора с большим напряжением КЗ: увеличение потерь реактивной мощности и напряжения. Преимуществом же является увеличение напряжения на шинах 0,4 кВ ТП при КЗ на одной из отходящих линий, что позволяет сохранить в работе потребителей электроэнергии, получающих питание по данным линиям, при возникновении КЗ.

При децентрализации узлов нагрузки и применении кабелей и проводов небольшого сечения даже при высоком значении тока КЗ на шинах 0,4 кВ ТП 10/0,4 кВ и 6/0,4 кВ величины токов КЗ на шинах 0,4 кВ групповых щитков в редких случаях превышают паспортные значения отключающей способности модульных автоматических выключателей ввиду высокого удельного сопротивления кабелей и проводов малого сечения. Таким образом, рациональное построение схемы электроснабжения также может привести к уменьшению величины тока КЗ. Вместе с тем, в связи со снижением протекающей по линии электропередачи мощности, потери активной и реактивной мощностей, а также потери напряжения в большинстве случаев имеют тот же уровень, что и при централизованной схеме. Однако децентрализация узлов нагрузки не всегда рациональна, действенна и применима.

Описанные решения базируются на принципе увеличения последовательно включенного в цепь КЗ сопротивления. Гораздо большего эффекта при ограничении тока КЗ можно достичь применением автоматических выключателей и предохранителей с функцией токоограничения, предусматривающей отключение поврежденного участка до достижения током КЗ максимального значения. Использование данного метода позволяет избежать увеличения потерь реактивной мощности и напряжения. Вместе с тем введение дополнительного сопротивления в цепь КЗ может привести к тому, что значение тока однофазного КЗ в режиме с минимальным ожидаемым током КЗ на выводах наиболее удаленного потребителя не будет удовлетворять требованиям п. 1.7.79 Правил устройства электроустановок (кратность 3 по отношению к номинальному току плавкой вставки или номинальному току обратнoзависимой характеристики расцепителя для сети с глухозаземленной нейтралью) [1].

Снижение амплитуды и длительности протекания тока КЗ приводит к уменьшению количества выделяемой в проводниках и аппаратах энергии, что в свою очередь ведет к снижению сквозного тока, протекающего через автоматический выключатель (следовательно, снижению электродинамического воздействия при протекании тока КЗ), и снижению выделяющегося в оборудовании термического импульса (т. е. снижению теплового воздействия при протекании тока КЗ). Графическая зависимость, характеризующая ограничение ударного тока КЗ и снижение выделяемой тепловой энергии, приведена на рис. 1.

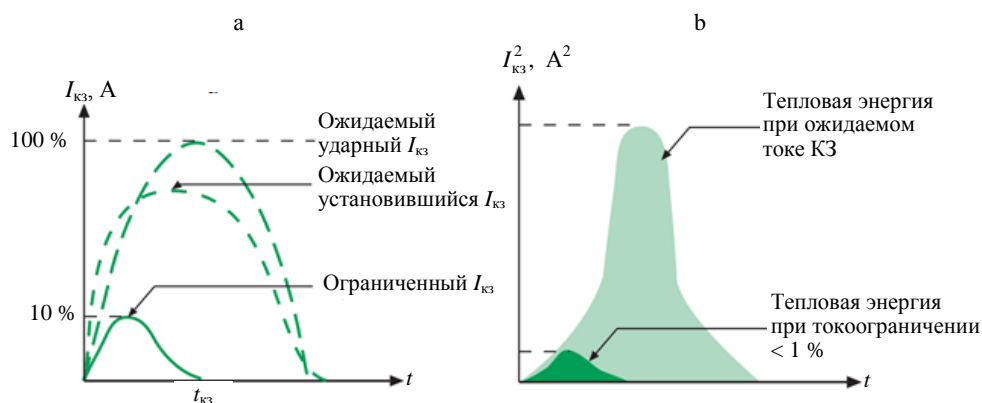


Рис. 1. Графическая зависимость, характеризующая ограничение ударного тока короткого замыкания (а) и снижение выделяемой тепловой энергии (б) [2]

Fig. 1. Surge short circuit current (a) and thermal energy (b) limitation characteristic curve [2]

Токоограничивающий автоматический выключатель в пределах заданного диапазона тока предотвращает достижение сквозным током ожидаемого пикового значения и ограничивает сквозную энергию значением, меньшим, чем сквозная энергия волны полупериода симметричного ожидаемого тока [3]. Токоограничение автоматического выключателя обеспечивается за счет конструкции его полюсов. При различном направлении

протекания электрического тока в двух параллельных проводниках возникающие электродинамические усилия отталкивают их друг от друга. Конструкция полюса, приведенная на рис. 2, позволяет полностью или частично разомкнуть контакты выключателя быстрее, чем передаются усилия от электромагнитного расцепителя через привод. Величина электродинамических усилий зависит от квадрата тока, следствием чего является высокая эффективность метода при больших токах КЗ.

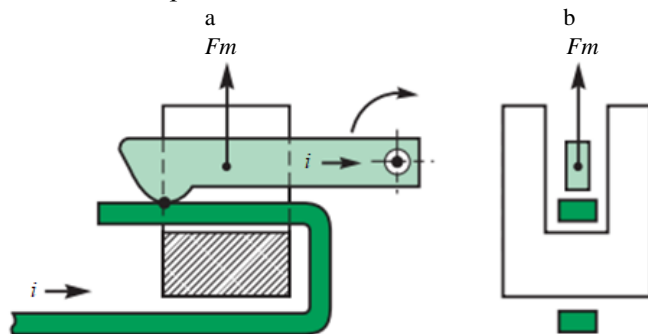


Рис. 2. Конструкция полюса автоматического выключателя с реализацией отталкивания контактов во фронтальной (а) и профильной (б) проекциях [2]: i – протекающий ток; F_m – вызванное электродинамическое усилие

Fig. 2. Design of the circuit breaker pole with implementation of contact repulsion in frontal (a) and profile (b) projections [2]: i – flowing current; F_m – induced electrodynamic force

Токоограничение предохранителя обеспечивается за счет конструктивных особенностей его плавкой вставки, которая в процессе и в результате срабатывания в установленном диапазоне токов ограничивает ток до более низкого значения, чем пиковое значение ожидаемого тока [4]. К особенностям конструкции токоограничивающих предохранителей относятся металлургический эффект, наличие перешейков меньшего сечения, установленных параллельно плавким вставкам и кварцевого песка.

Металлургический эффект – способность растворять некоторые тугоплавкие металлы в легкоплавких с изменением их физических параметров, в частности удельного сопротивления. Повышение сопротивления плавкой вставки приводит к увеличению выделяющейся в предохранителе энергии (так как количество выделяющейся теплоты пропорционально активному сопротивлению плавкой вставки) и повышению температуры вставки, что ускоряет ее плавление и разрушение. Чаще всего в качестве менее тугоплавкого металла применяют олово. Установка шариков легкоплавкого металла в перешейках меньшего сечения увеличивает сопротивление данного участка плавкой вставки и ускоряет происходящие при металлургическом эффекте процессы.

Наличие установленных параллельно плавким вставкам приводит к тому, что при разрушении одной из них величина тока, протекающего по остальным, увеличивается, выделяющаяся в предохранителе энергия тоже увеличивается, что приводит к повышению температуры плавкой вставки, плавлению и разрушению.

Наличие кварцевого песка способствует более интенсивному охлаждению электрической дуги. Как следствие, напряжение ее горения превышает напряжение сети, и уже до естественного прохождения тока через нуль электрическая дуга гаснет.

Конструкция токоограничивающей плавкой вставки изображена на рис. 3.

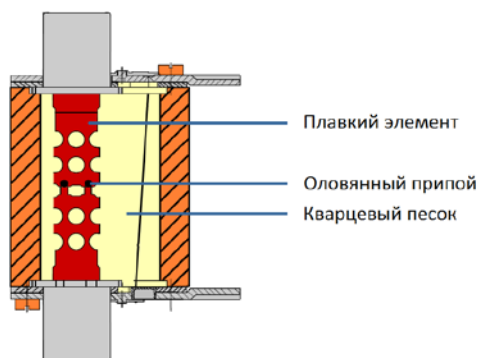


Рис. 3. Конструкция токоограничивающего предохранителя [5]

Fig. 3. Current limitation fuse design [5]

Полное время отключения автоматического выключателя (время от момента КЗ до момента погасания электрической дуги) и значение протекающего тока КЗ определяются таким параметром, как класс токоограничения. Выделяют три класса токоограничения автоматических выключателей, каждый из которых характеризует максимальную величину термического импульса КЗ, выделяемого в оборудовании при протекании тока КЗ. Для первого класса токоограничения максимальная допустимая величина термического импульса не установлена стандартом, а для третьего имеет минимальное значение. Максимальные допустимые термические импульсы для автоматических выключателей с различными классами токоограничения, номинальными токами и характеристиками срабатывания приведены в стандарте [6]. Допустимые в [6] значения термического импульса для автоматических выключателей с номинальным током до 16 А и обратнозависимыми характеристиками категорий В и С включительно представлены в табл. 1.

Таблица 1

Допустимые значения термического импульса I^2t , $A^2 \cdot s$, для автоматических выключателей с номинальным током до 16 А включительно

Permissible values of the thermal pulse I^2t , $A^2 \cdot s$, for circuit breakers with rated current up to and including 16 A

Отключающая способность, А	Термический импульс при классе токоограничения				
	1	2		3	
	Для характеристики				
	В, С	В	С	В	С
3000	Не ограничен	31000	37000	15000	18000
4500		60000	75000	25000	30000
6000		100000	120000	35000	42000
10000		240000	290000	70000	84000

Однако ввиду того, что ток КЗ никогда не должен превышать отключающую способность выключателя (которая является максимальным допустимым сквозным током автоматического выключателя), для определения величины ограниченного тока КЗ и термического импульса при известном расчетном значении тока КЗ до токоограничения принято пользоваться характеристиками токоограничения оборудования. Также данные характеристики учитывают различие между требованиями стандарта [6] и фактическими параметрами оборудования.

Характеристики токоограничения предохранителей серии ППН приведены на рис. 4, ограничения ударного тока КЗ и тепловой энергии КЗ модульных автоматических выключателей Schneider Electric iC60N – на рис. 5, 6 соответственно. Ввиду распространенности модульных выключателей и предохранителей схожей конструкции стоит отметить, что большое количество применяемых защитных аппаратов на номинальные токи до 63 А имеют функцию токоограничения.

Из рис. 4–6 можно определить, что наибольшее ограничение пропускаемой энергии и ударного тока в процентном соотношении к значению токоограничения в случае применения токоограничивающих предохранителей и автоматических выключателей достигается при значениях тока КЗ, близких к отключающей способности аппарата защиты.

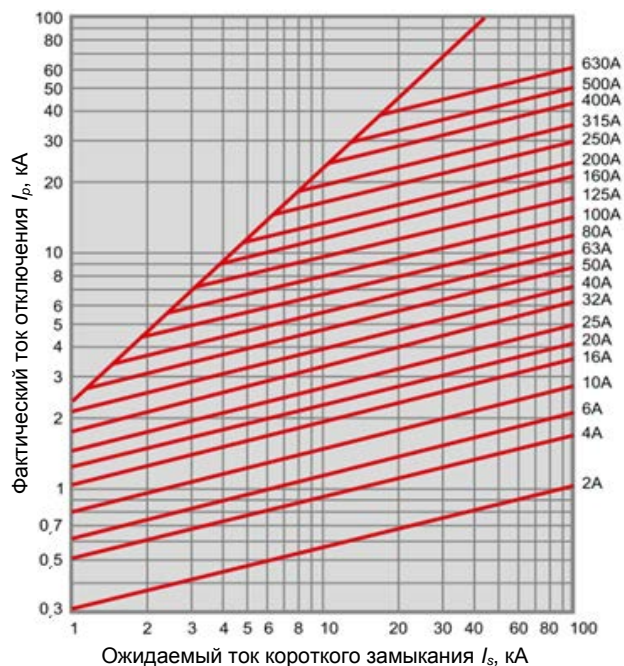


Рис. 4. Токоограничение периодической составляющей тока короткого замыкания предохранителей ППН [7]

Fig. 4. Characteristic of limiting the periodic component of the short-circuit current of the PPN fuses [7]

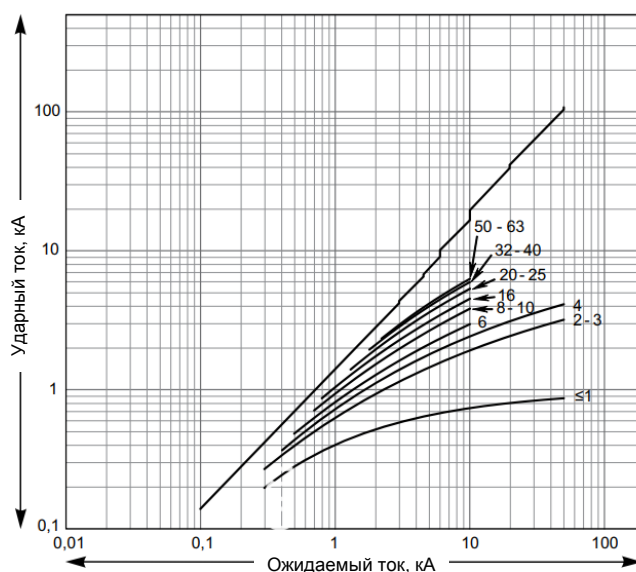


Рис. 5. Ограничение ударного тока короткого замыкания автоматического выключателя Schneider Electric iC60N (3P, категория C, класс 3) [8]

Fig. 5. Limiting the short circuit surge current of the Schneider Electric iC60N circuit breaker (3P, category C, class 3) [8]

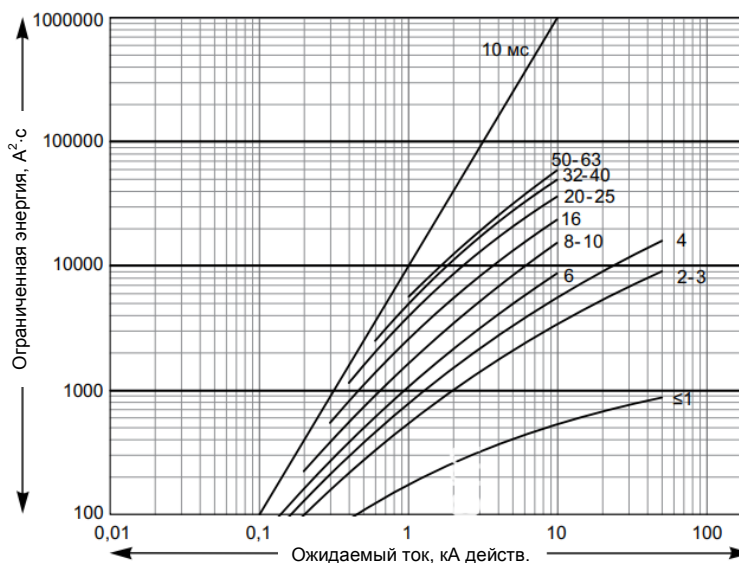


Рис. 6. Ограничение тепловой энергии короткого замыкания автоматического выключателя Schneider Electric iC60N (3P, категория C, класс 3) [8]

Fig. 6. Limiting the short circuit thermal energy of the Schneider Electric iC60N circuit breaker (3P, category C, class 3) [8]

Данный эффект объясняется следующим образом. Эффективность токоограничения характеризуется тем, что зависимость тепловой энергии, вы-

деляемой в оборудовании при протекании тока КЗ, от величин тока КЗ, а также зависимость электродинамических усилий при протекании тока КЗ от величин тока КЗ квадратичны ($W = I^2 R t$; $F = c i^2$, где W – электроэнергия, расходуемая на нагрев элемента электрической сети, кВт·ч; I – действующее значение тока КЗ, А; R – активное сопротивление элемента электрической сети, Ом; F – электродинамическое усилие, Н; c – расчетный коэффициент; i – ударный ток КЗ, А. Следовательно, при уменьшении тока КЗ на 20 % происходит снижение электродинамического и термического воздействий на 36 %, а при уменьшении тока КЗ на 50 % – снижение электродинамического и термического воздействий на 75 %, что говорит об эффективности результатов токоограничения при высоких значениях токов КЗ. В то же время применение токоограничивающих защитных аппаратов приводит к увеличению пределов селективности выключателей и помогает добиться полной селективности в режиме КЗ.

При наличии нижестоящего аппарата защиты с функцией ограничения тока КЗ происходит ограничение термического импульса, выделяющегося в вышестоящем выключателе без функции токоограничения, что, в свою очередь, приводит к снижению времени срабатывания при КЗ на смежном участке и увеличению пределов селективности. В случае если вышестоящий аппарат защиты также имеет функцию токоограничения, обеспечение селективности при протекании значительной величины тока КЗ осуществляется согласно данным производителя.

Как отмечалось ранее, количество выделившейся тепловой энергии в защитном аппарате и защищаемой электроустановке зависит от квадрата тока ($W = I^2 R t$). Для определения количества выделившейся энергии используется понятие термического импульса, или интеграла Джоуля ($B_k = I t$). Интеграл Джоуля – условная величина, характеризующая тепловое действие тока КЗ на рассматриваемый элемент электроустановки, численно равная интегралу от квадрата тока КЗ по времени в пределах от начального момента КЗ до момента его отключения [9].

Интеграл Джоуля как характеристика защитного аппарата определяет количество энергии, которую он способен пропустить через себя до момента отключения тока КЗ [10]. Ввиду того, что при малом времени отключения, согласно уравнению теплового баланса, теплообменом с окружающей средой можно пренебречь, вся электрическая энергия, выделяющаяся в защитном аппарате, расходуется на его нагрев (нагрев плавкой вставки предохранителя или теплового расцепителя автоматического выключателя), что приводит к отключению аппарата. Таким образом, селективность защитных аппаратов обеспечивается при условии, что энергия, выделяющаяся при протекании тока КЗ, должна приводить к отключению нижестоящего аппарата защиты, а выделяющаяся за время срабатывания нижестоящего аппарата защиты и время гашения электрической дуги в вышестоящем аппарате энергия не должна приводить к отключению вышестоящего аппарата защиты. Такой метод называется энергетической селективностью.

Данные производителя, по которым можно определить, селективны ли два токоограничивающих защитных аппарата, приводятся в табличной [11] или графической форме. Графики энергетической селективности показывают величины термических импульсов: приводящих к срабатыванию аппарата защиты и выделяющихся в аппарате за полное время отключения. Величина ограниченного термического импульса (тепловой энергии) для выбора оборудования с учетом токоограничения также может определяться по указанным графикам. Аналогично график энергетической селективности может быть получен из характеристики ограничения тепловой энергии КЗ.

График определения энергетической селективности плавких вставок gG предохранителей АВВ приведен на рис. 7, график ее обеспечения представлен в [11, 12].

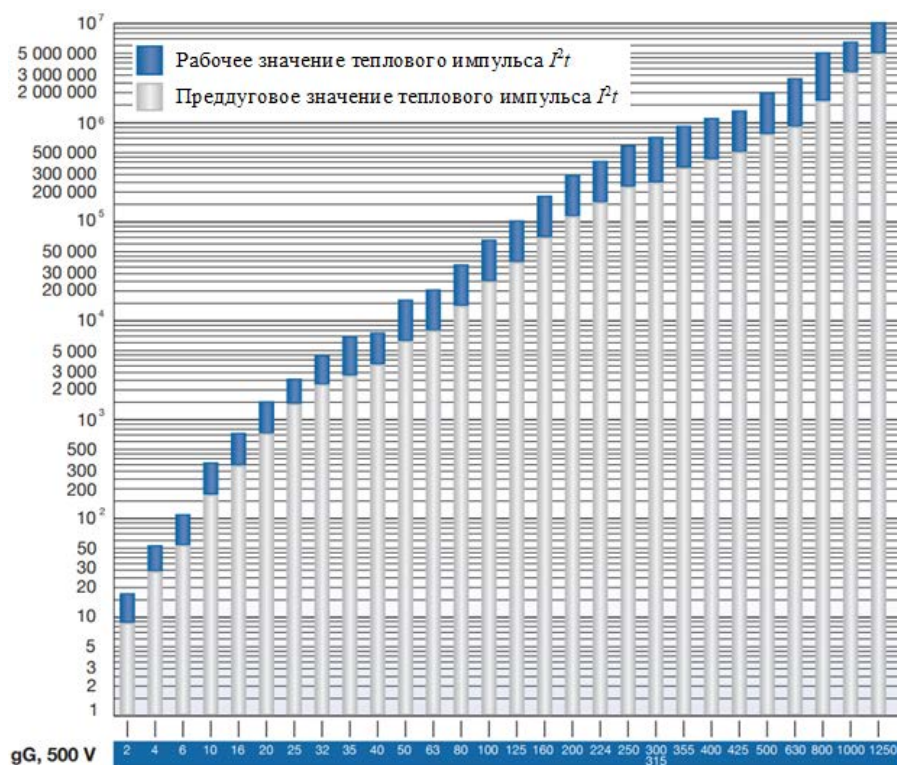


Рис. 7. График определения энергетической селективности плавких вставок gG предохранителей АВВ [12]

Fig. 7. Graph of determining energy selectivity of gG fuse links of АВВ fuses [12]

ВЫВОДЫ

1. Применение токоограничивающего оборудования в сетях с высоким значением тока короткого замыкания позволяет существенно снизить стоимость сетей электроснабжения и распределительных устройств при питании потребителей малой мощности.

2. Использование различных методов токоограничения в сетях с низкими значениями токов короткого замыкания не только влечет за собой неоправданные дополнительные затраты, но и может привести к уменьшению чувствительности автоматических выключателей к току короткого замыкания в конце защищаемого участка до значения ниже допустимого техническими нормативными правовыми актами.

3. Наиболее действенным методом токоограничения в сетях до 1 кВ является применение токоограничивающих защитных аппаратов.

4. Ограничение тока короткого замыкания позволяет повысить эффективность использования мини-энергокомплексов [13].

5. Описанные мероприятия следует проводить на этапе проектирования ввиду нерациональности замены оборудования, не выработавшего свой ресурс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок / 6-е изд., перераб. и доп., с изм. М.: Энергоатомиздат, 1986. 648 с.
2. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск № 4. Координация защит низкого напряжения [Электронный ресурс]. Schneider Electric, 2006. Режим доступа: https://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/TechLibrary/Vipusk4-Koordinacia_zashit.pdf.
3. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 2. Автоматические выключатели: ГОСТ ИЕС 60947-2–2014. Введ. 01.10.2021. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. 128 с.
4. Предохранители плавкие низковольтные. Часть 1. Общие требования: ГОСТ ИЕС60269-1–2016. Введ. 01.03.2019. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2016. 68 с.
5. Принцип работы предохранителя [Электронный ресурс] // КЭАЗ. 2016. Режим доступа: <https://keaz.ru/company/press-center/blog/2016/864-princip-raboti-i-ustroystvo-predohranitelya>. Дата доступа: 20.05.2021.
6. Аппаратура малогабаритная электрическая. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения. Часть 1. Автоматические выключатели для переменного тока: ГОСТ ИЕС 60898-1–2020. Введ. 01.10.2021. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2020. 124 с.
7. Электротехническая продукция для профессионалов. Мастер каталог № 29, 2020 [Электронный ресурс] / ЕКФ. 2020. Режим доступа: <https://ekfgroup.com/uploads/pos-articles/2020-05/master-katalog-29.pdf>.
8. Acti 9. Эффективность, достойная Вас, 2019: технический каталог [Электронный ресурс] / Schneider Electric. 2019. Режим доступа: <https://shop.idelectro.ru/upload/docs/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%20Acti9%202019.pdf>.
9. Короткие замыкания в электроустановках: ГОСТ 26522–85. Введ. 01.07.1986. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1985. 20 с.
10. Низковольтное оборудование. Защита на предохранителях. Выключатели нагрузки с предохранителями [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://library.e.abb.com/public/3b93e50521914de6b2d24fd13c6892af/Fusegear.pdf>. Дата доступа: 03.06.2021.
11. Капустинский, А. Ю. Повышение чувствительности защит в электрических сетях до 1 кВ путем применения микропроцессорных и полупроводниковых расцепителей / А. Ю. Капустинский, С. В. Константинова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 5. С. 393–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-393-407>.

12. Низковольтное оборудование. Выключатели нагрузки до 4000 А. Технический каталог [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://library.e.abb.com/public/7d10d20cd44acd254825794b0039535d9CND00000000346-4-5.pdf>. Дата доступа: 03.06.2021.
 13. Константинова, С. В. Расчет емкости для работы мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора в автономном режиме / С. В. Константинова, А. Ю. Капустинский, Т. М. Ярошевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50>.
- Поступила 30.06.2020 Подписана в печать 06.09.2021 Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. *Rules for the Arrangement of Electrical Installations. The Sixth Edition, Revised and Supplemented, with Changes*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 648 (in Russian).
2. Schneider Electric (2006) Schneider Electric Technical Collection. Iss. 4. *Coordination of Low Voltage Protections*. Available at: https://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/TechLibrary/Vipusk4-Koordinacia_zashit.pdf (in Russian).
3. State Standard IEC 60947-2–2014. *Low-Voltage Distribution and Control Equipment. Part 2. Circuit Breakers*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2014. 128 (in Russian).
4. State Standard IEC 60269-1–2016. *Low-Voltage Fuses. Part 1. General Requirements*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2016. 68 (in Russian).
5. The Principle of Operation of the Fuse. *Kursk Electrical Equipment Plant*. 2016. Available at: <https://keaz.ru/company/press-center/blog/2016/864-princip-raboti-i-ustroystvo-predohranitelya> (Accessed 20 May 2021) (in Russian).
6. State Standard IEC 60898-1–2020. *Small-Sized Electrical Equipment. Circuit Breakers for Protection Against Overcurrents for Household and Similar Purposes. Part 1. Circuit Breakers for Alternating Current*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2020. 124 (in Russian).
7. EKF (2020) *Electrical Products for Professionals: Master Catalog No. 29, 2020*. Available at: <https://ekfgroup.com/uploads/pos-articles/2020-05/master-katalog-29.pdf> (in Russian).
8. Schneider Electric (2019) *Acti 9. Efficiency Worthy of You*. Available at: <https://shop.idelectro.ru/upload/docs/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%20Acti9%202019.pdf> (in Russian).
9. State Standard 26522–85. *Short Circuits in Electrical Installations*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1985. 20 (in Russian).
10. *Low-Voltage Equipment. Protection on Fuses. Load Switches with Fuses* [Electronic Resource]. Available at: <https://library.e.abb.com/public/3b93e50521914de6b2d24fd13c6892af/Fusegear.pdf> (Accessed 3 June 2021) (in Russian).
11. Kapustinski A. Yu., Kanstantsinava S. V. (2021) Increasing the Sensitivity of Protections in Electrical Networks up to 1 kV by Using Microprocessor and Semiconductor Release Tripping Devices. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (5), 393–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-393-407> (in Russian).
12. *Low-Voltage Equipment. Load Switches up to 4000 A. Technical Catalog*. Available at: https://www.abn.ru/files/abb/Catalogue_Switches.pdf (Accessed 3 June 2021) (in Russian).
13. Konstantinova S. V., Kapustinskii A. Yu., Yaroshevich T. M. (2021) Calculation of the Capacity for the Operation of a Mini-Energy Complex Based on an Independently Operating Asynchronous Generator. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50> (in Russian).

Received: 30 June 2020 Accepted: 6 September 2021 Published online: 30 November 2021