

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-393-407>

УДК 620.9

Повышение чувствительности защит в электрических сетях до 1 кВ путем применения микропроцессорных и полупроводниковых расцепителей

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 рассматривается вопрос эффективности функционирования электрических сетей до 1 кВ, а именно возможность повышения чувствительности защит в сетях до 1 кВ, что способствует снижению токов срабатывания защиты и соответственно уменьшению сечения кабельно-проводниковой продукции. Показана актуальность данной проблемы и определены задачи исследования. Большое внимание уделено понятию селективности, в том числе полной и частичной. Достаточно глубоко проработан вопрос о том, какие защитные аппараты можно считать селективными. Представлен пример определения селективных выключателей в результате лабораторных исследований, проводимых производителем оборудования. Систематизированы и подробно описаны негативные явления, имеющие место при обеспечении селективности защит в сетях до 1 кВ. На основе сравнительного анализа параметров автоматических выключателей с расцепителями различных типов предложено решение данной проблемы путем использования автоматических выключателей с микропроцессорными и полупроводниковыми расцепителями. Выполнена оценка эффективности применения микропроцессорных расцепителей в зависимости от номинального тока автоматического выключателя. Рассмотрены и указаны дополнительные преимущества микропроцессорных автоматических выключателей, а также обозначены их недостатки. Перечислены основные ожидаемые положительные эффекты от применения автоматических выключателей с микропроцессорными расцепителями с учетом того, что данный тип выключателей рассматривается как комплекс заменяемых ими устройств. В то же время отмечено, что для выполнения поставленной задачи нет необходимости устанавливать комплексные решения на базе расцепителя с применением микроконтроллера, а достаточно простейшего устройства, работа которого основана на данном принципе.

Ключевые слова: автоматический выключатель, предохранитель, отключение, карта селективности, времятоковая характеристика, обратнозависимая характеристика, чувствительность, защита от перегрузки, защита от коротких замыканий, расцепитель, плавкая вставка, микропроцессорный расцепитель, выбор оборудования, энергетическая селективность

Для цитирования: 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>

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

Increasing the Sensitivity of Protections in Electrical Networks up to 1 kV by Using Microprocessor and Semiconductor Release Tripping Devices

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

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

²⁾ALC «ENECA» (Minsk, Republic of Belarus)

Abstracts. The paper deals with the problem of increasing the efficiency of the functioning of electric networks up to 1 kV, namely, the possibility of increasing the sensitivity of protections in networks up to 1 kV, which helps to reduce the protection response currents and, accordingly, reduce the cross-section of cable and wire products. The topicality of this problem is shown and the research tasks are defined. Much attention is paid to the concept of selectivity; attention is also paid to the concepts of full and partial selectivity. “Which protective devices can be considered selective?” is a question that is considered and worked out in sufficient depth in the paper. The negative phenomena that occur when ensuring the selectivity of protections in networks up to 1 kV are systematized and described in detail. Based on a comparative analysis of the parameters of circuit breakers with release tripping devices of various types, a solution to this problem is proposed by using circuit breakers with microprocessor and semiconductor release tripping devices. Additional advantages of microprocessor-based circuit breakers are considered and indicated, as well as their disadvantages are indicated, too. The main expected positive effects from the use of circuit breakers with microprocessor release tripping devices are listed, taking into account the fact that this type of circuit breakers is considered as a complex of devices replaced by it. The article can be recommended to employees of electric power specialties working with networks up to 1 kV.

Keywords: circuit breaker, fuse, disconnection, selectivity chart, current-time characteristics, reverse-dependent characteristic, sensitivity, overload protection, short-circuit protection, release tripping device, plug fuse, microprocessor release tripping device, equipment selection, energy selectivity

For citation: Kapustsinski 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (5), 393–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-393-407> (in Russian)

Введение

При построении схем электроснабжения напряжением до 1 кВ в случае невозможности организации групповых щитов с большим числом подключений расчетная нагрузка небольшой группы потребителей может оказаться равной или меньше номинального тока потребителя наиболее мощного присоединения. Основным критерием выбора вводного автоматического выключателя является селективность, несоблюдение которой способно привести к отключению всех потребителей данной группы при перегрузке или коротком замыкании на отходящей линии. Селективными должны быть вводной аппарат защиты и аппарат защиты, установленный в начале питающей линии. В свою очередь, аппарат защиты в начале питающей линии должен быть селективен с вводным аппаратом защиты данного распределительного устройства и т. д.

Поскольку в сетях до 1 кВ селективность аппаратов защиты с обратно-зависимой времятоковой характеристикой обеспечивается увеличением тока срабатывания, последний может оказаться настолько завышен, что осуществить защиту сети от коротких замыканий согласно действующим техническим нормативным правовым актам не представится возможным, ввиду того что коэффициент чувствительности окажется меньше регламентированного значения.

Основная часть

Селективным считается защитный аппарат, ток срабатывания которого на один-два порядка из стандартного ряда больше, чем у нижестоящего, если физический принцип анализа тока в последовательной цепи защитного аппарата основан на преобразовании электрической энергии в тепловую (предохранитель или автоматический выключатель с тепловым расцепителем). Неточность формулировки (один-два порядка) обусловлена тем, что значения, последовательно стоящие в стандартном ряду номинальных токов расцепителя выключателей или в стандартном ряду номинальных токов плавкой вставки предохранителей, а также разброс значений тока срабатывания и времятоковые характеристики аппаратов защиты отличаются у различных производителей, так как не все выпускаемые защитные аппараты рассчитаны на промежуточное значение, допустимое согласно стандартному ряду, определенному ГОСТ 9098–93 [1].

Точную информацию о том, являются ли защитные аппараты селективными, можно получить только от производителя оборудования ввиду большого количества влияющих на данный параметр факторов. Условная схема электроснабжения с селективными, согласно данным производителя, автоматическими выключателями приведена на рис. 1. Информация об обеспечении селективности представлена в табличной форме на рис. 2.

Автоматические выключатели зачастую работают в системах электроснабжения вместе с предохранителями в качестве как выше-, так и нижестоящих аппаратов защиты. Следовательно, возникает необходимость координации защит между собой при данных вариантах конфигурации сети.

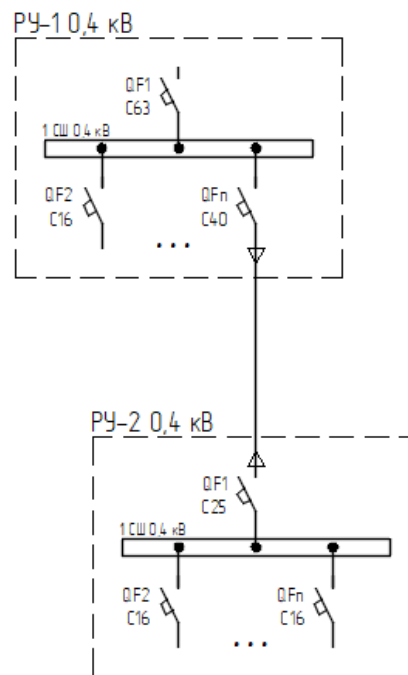


Рис. 1. Условная схема электроснабжения, обладающая селективностью

Fig. 1. A conditional power supply scheme with selectivity

Для этой цели производителем оборудования составляются таблицы селективности, аналогичные приведенной на рис. 2.

Вышестоящий аппарат		iC60N/H/L														
		Кривая С														
In (A)		1	2	3	4	6	10	13	16	20	25	32	40	50	63	
Нижестоящий аппарат		1P, 1P+N 2P (380-415 В) двухфазная сеть 3P, 3P+N 4P														
Предельный ток селективности (А)																
iC60N/H/L	0.5	8	60	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
Кривая В	1		16	24	32	70	180	210	370	590	1100	2400	7000	T	T	
	2			24	32	48	140	160	220	310	460	780	1200	2000	2000	
	3				5	48	120	104	190	280	380	580	820	1400	1400	
	4					14	80	104	130	240	300	430	590	1000	1100	
	6						80	104	130	160	200	380	480	770	850	
	10								104	130	160	200	260	320	680	
	13										160	200	260	320	600	
	16											200	260	320	600	
	20												260	320	400	
	25													320	400	
	32														400	
	40														500	
	50														500	
Предельный ток селективности (А)																
iC60N/H/L	0.5	8	50	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
Кривая С	1		16	24	32	70	180	210	370	590	1100	2400	7900	T	T	
	2			24	32	48	120	160	220	310	460	780	1200	2000	2000	
	3					16	80	104	190	280	380	480	820	1400	1400	
	4						14	80	104	130	160	300	430	590	1000	
	6							80	104	130	160	200	380	480	770	
	10									130	160	200	260	320	680	
	13											55	200	260	320	
	16												71	260	320	
	20													260	320	
	25														127	
	32															168
	40															500
	50															500
Предельный ток селективности (А)																
iC60N/H/L	0.5		50	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
Кривая D	1			24	32	70	180	210	370	590	1100	2400	7900	T	T	
	2				25	48	120	160	220	310	460	680	1200	2000	2000	
	3					15	80	104	130	240	380	480	710	1400	1400	
	4						28	100	130	160	300	430	590	1000	910	
	6									130	160	200	260	480	770	
	10										73	200	260	320	600	
	13											79	260	320	600	
	16												71	194	320	
	20													135	400	
	25														174	
	32															277
	40															277

Рис. 2. Таблица селективности автоматических выключателей Schneider Electric Acti9 iC60, предоставляемая производителем [2]: Т – абсолютная селективность; пустая ячейка – селективность отсутствует; заполненная цифрой ячейка – предельный ток селективности

Fig. 2. The selectivity table of Schneider Electric Acti9 iC60 circuit breakers provided by the manufacturer [2]: T – total selectivity; empty cell – no selectivity; the cell filled with number – the limit current of selectivity

Селективность аппаратов защиты определяется производителем опытно-аналитическим путем на основе анализа критериев селективности в критических точках защитных характеристик (точки, в которых характеристики срабатывания аппаратов защиты наиболее приближены друг к другу)

с использованием результатов конструкторских расчетов и данных, полученных в ходе испытаний. Защитные характеристики с отмеченными критическими точками представлены на рис. 3.



Рис. 3. Исследуемые времятоковые характеристики предохранителя и выключателя с указанием критических точек [3]

Fig. 3. Time-current characteristics of the fuse and breaker with indication of critical points being under study

Таблицы селективности составляются по значению теплового импульса, выделяющегося в автоматическом выключателе, характеризующего значение энергии в тепловом расцепителе. Согласно уравнению теплового баланса, электрическая энергия в электрическом аппарате частично расходуется на его нагрев (нагрев плавкой вставки предохранителя или теплового расцепителя автоматического выключателя, что приводит к отключению) и частично уходит в окружающую среду. Теплообмен аппарата с окружающей средой зависит от разности температур, параметров изделия и времени протекания сверхтока. Последнее позволяет пренебречь теплообменом с окружающей средой при быстром отключении. Селективность защитных аппаратов при протекании токов, значительно превышающих номинальный ток теплового расцепителя, обеспечивается при условии, что энергия, выделяемая в процессе протекания тока короткого замыкания, должна приводить к отключению нижестоящего аппарата защиты, а энергия, выделяемая за время срабатывания нижестоящего аппарата защиты и гашения электрической дуги в вышестоящем аппарате, не должна приводить к отключению вышестоящего аппарата защиты. Данный метод называется энергетической селективностью. Графическое представление условия обеспечения энергетической селективности приведено на рис. 4.

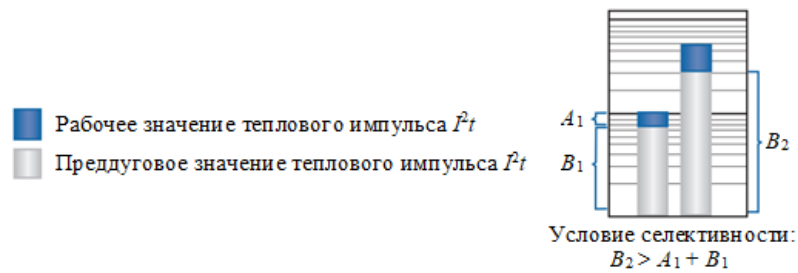


Рис. 4. График обеспечения энергетической селективности [4]

Fig. 4. Power supply selectivity provision diagram [4]

В некоторых случаях производитель предоставляет графики энергетической селективности для определения селективных аппаратов защиты, однако в большинстве случаев анализ полученных опытным путем данных о величине теплового импульса, необходимого для отключения оборудования, выполняется непосредственно производителем.

Подтверждение селективности двух аппаратов защиты различных производителей невозможно получить от завода-изготовителя, так как он не несет ответственности за оборудование конкурентов. Также это привело бы к значительному увеличению числа необходимых опытов, объема справочного материала и усложнению выбора оборудования.

Определение границ селективности усложняется при малых значениях тока короткого замыкания и протекании тока перегрузки. Это связано со значительным влиянием теплообмена с окружающей средой во время срабатывания автоматического выключателя. Следовательно, определение границ селективности по величине интеграла Джоуля не так эффективно ввиду различия параметров выше- и нижестоящего аппаратов защиты, характеризующих теплообмен с окружающей средой.

В большинстве случаев принято считать селективными два защитных аппарата, принцип работы которых основан на преобразовании электрической энергии в тепловую, если ток срабатывания вышестоящего аппарата в 1,6 раза больше, чем нижестоящего. Число 1,6 является типовым множителем для получения стандартного ряда токов и мощностей оборудования. Эта зависимость подтверждается опытными данными (рис. 1) и указана в [5, п. 3.1.11]. Для автоматических выключателей и предохранителей данная зависимость может быть записана в виде:

$$\frac{I_{\text{расц.в}}}{I_{\text{расц.н}}} \geq 1,6; \quad (1)$$

$$\frac{I_{\text{пл.в}}}{I_{\text{пл.н}}} \geq 1,6, \quad (2)$$

где $I_{\text{расц.в}}$, $I_{\text{расц.н}}$ – номинальный ток теплового расцепителя выше- и нижестоящего автоматических выключателей соответственно, А; $I_{\text{пл.в}}$, $I_{\text{пл.н}}$ – то же плавкой вставки выше- и нижестоящего предохранителей, А.

Однако добиться абсолютной селективности автоматических выключателей с тепловыми расцепителями или предохранителей невозможно в силу физических аспектов работы данных аппаратов. Большой разброс времени срабатывания при одном и том же токе срабатывания (рис. 5) приводит к тому, что даже автоматические выключатели, обладающие селективностью согласно (1), (2) и таблице селективности производителя (рис. 2), не являются абсолютно селективными по карте селективности (рис. 6).

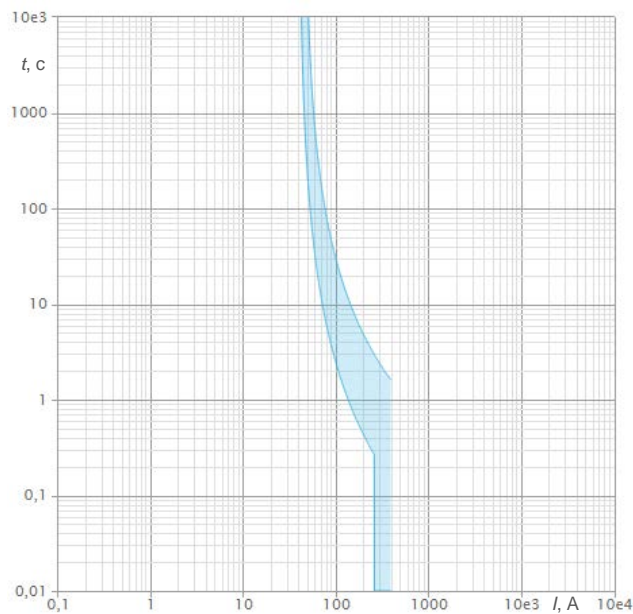


Рис. 5. Времятоковая характеристика трехполюсного автоматического выключателя с тепловым расцепителем Schneider Electric iC60N C40

Fig. 5. Time-current characteristics of the Schneider Electric iC60N C40 three-pole circuit breaker with thermal release tripping device

Особенности построения схем электроснабжения до 1 кВ позволяют предположить, что ложное срабатывание вышестоящего защитного аппарата с большим током срабатывания невозможно, если оборудование находится в пределах одного распределительного устройства, т. е. в идентичных условиях окружающей среды, так как нивелируется один из параметров, характеризующих размах значений. Однако для аппарата защиты, установленного в начале линии электропередачи, питающей группу потребителей, параметры окружающей среды могут значительно отличаться от параметров окружающей среды вводного защитного аппарата данной группы потребителей. На стадии проектирования определить это зачастую не представляется возможным, что приводит к необходимости замены оборудования при опытной эксплуатации и, как следствие, дополнительным затратам.

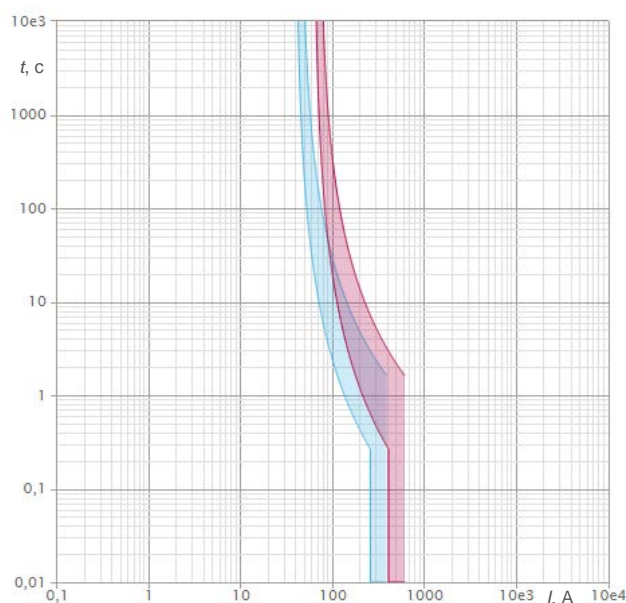


Рис. 6. Карта селективности трехполюсных автоматических выключателей с тепловыми расцепителями Schneider Electric iC60N C40 (синяя область) и C63 (красная область)

Fig. 6. The Schneider Electric iC60N C40 (blue area) and C63 (red area) three-pole circuit breakers with thermal release tripping devices selectivity chart

Помимо этого, очевидна тенденция значительного увеличения и искусственного завышения номинальных токов применяемых аппаратов защиты в цепочке от потребителя к все более крупным распределительным устройствам ввиду условия селективности. Особенно ярко такая тенденция прослеживается при необходимости достижения абсолютной селективности. В данном случае, помимо повышения стоимости оборудования, при переходе к большему типоразмеру автоматического выключателя чувствительность защит значительно снижается.

Согласно [5, п. 1.7.79], в электроустановках до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью возникающий ток короткого замыкания должен превышать ток плавкого элемента ближайшего предохранителя либо номинальный ток нерегулируемого расцепителя или уставку тока регулируемого расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратно зависимую от тока характеристику, не менее чем в три раза.

Увеличение тока срабатывания защитного аппарата может привести к несрабатыванию или затянутому срабатыванию при коротком замыкании в сети, значительно электрически удаленной от источника питания. Это, в свою очередь, требует применения более сложных и дорогостоящих защит для обеспечения необходимых чувствительности и быстродействия (например, защит нулевой последовательности для защиты от токов однофазных коротких замыканий). Вместе с тем, согласно [6], время срабаты-

вания автоматического выключателя при коротком замыкании не должно превышать 0,4 с для сети с номинальным фазным напряжением 230 В.

При частичной селективности автоматических выключателей с тепловыми расцепителями или предохранителей значительно сложнее выполнить требование защиты проводника от перегрузки, особенно при необходимости установки аппарата защиты на большие токи (в несколько сотен ампер). Происходит это ввиду следующей особенности.

Условия выбора теплового расцепителя автоматического выключателя и плавкой вставки предохранителя принимают вид выражений [5, 7]:

$$I_{\text{ном.р}} \geq I_{\text{р}}; \quad (3)$$

$$I_{\text{ном.пл}} \geq I_{\text{р}}; \quad (4)$$

$$I_{\text{ном.пл}} \geq \frac{I_{\text{пик}}}{\alpha}, \quad (5)$$

где $I_{\text{ном.р}}$, $I_{\text{ном.пл}}$ – номинальный ток теплового расцепителя автоматического выключателя и плавкой вставки предохранителя, А; $I_{\text{р}}$, $I_{\text{пик}}$ – расчетный и пиковый ток, А; α – коэффициент, учитывающий условия пуска.

В свою очередь, условие выбора проводника по допустимому нагреву в длительном режиме [5, 7]

$$I_{\text{дл}} \geq \frac{I_{\text{р}}}{K_{\text{п}}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{дл}}$ – длительно допустимый ток проводника при номинальных условиях, А; $K_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий условия прокладки.

При выборе оборудования по условиям (3)–(5) инженерная задача состоит в определении наиболее дешевого решения, т. е. кабеля с минимальным допустимым сечением и защитных аппаратов с минимальными токами срабатывания защиты. В случае необходимости защиты сети от перегрузки возникают дополнительные условия выбора оборудования [5, 7]:

$$\frac{I_{\text{ном.р}}}{I_{\text{дл}}} \leq 0,80; \quad (7)$$

$$\frac{I_{\text{ном.пл}}}{I_{\text{дл}}} \leq 0,80. \quad (8)$$

Как следует из (7) и (8), завышение тока срабатывания защиты (номинального тока теплового расцепителя автоматического выключателя или номинального тока плавкой вставки предохранителя) приводит к последующему завышению сечения кабельно-проводниковой продукции. При увеличении тока срабатывания защиты в 1,6 раза (выражения (1), (2)) и рас-

четном токе в несколько сотен ампер может произойти завышение сечения кабельно-проводниковой продукции в несколько раз, вплоть до применения нескольких проводников на каждую фазу согласно условию защиты от перегрузки.

Указанный негативный эффект менее выражен в случае применения автоматических выключателей с расцепителями на базе микроконтроллеров или полупроводников. Ввиду иных физических процессов, на которых основано действие расцепителя максимального тока с обратозависимой характеристикой данного типа выключателей, для микропроцессорных и полупроводниковых расцепителей характерен гораздо меньший разброс значений тока и времени срабатывания, что в свою очередь приводит к меньшему завышению тока срабатывания защиты при обеспечении полной селективности между автоматическими выключателями.

Времятоковые характеристики автоматических выключателей с полупроводниковыми расцепителями, обладающих абсолютной селективностью, представлены на рис. 7.

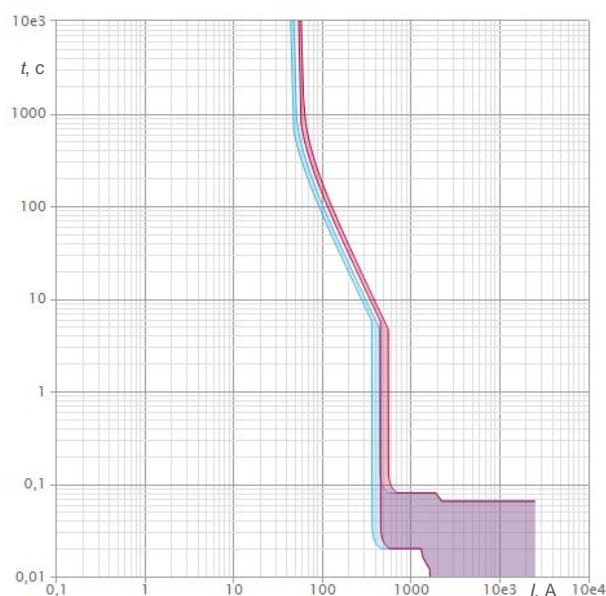


Рис. 7. Карта селективности двух трехполюсных автоматических выключателей Schneider Electric Compact NSX100B с микропроцессорными расцепителями Micrologic 2.2: синяя и красная области – нижестоящий и вышестоящий выключатели соответственно

Fig. 7. The two Schneider Electric Compact NSX100B three-pole circuit breakers with microprocessor release tripping devices Micrologic 2.2 selectivity chart: blue and red areas are for a downstream and an upstream breaker, respectively

При выборе регулируемого микропроцессорного или полупроводникового расцепителя, помимо выполнения условия (3), необходимо определить уставку данного расцепителя:

$$I_{\text{уст.р}} \geq I_{\text{р}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{уст.р}}$ – ток уставки микропроцессорного или полупроводникового регулируемого расцепителя автоматического выключателя, А.

Уставки расцепителей автоматических выключателей, изображенных на рис. 7, приведены на рис. 8 (уставка отсечки (I_{sd}) принята максимальной для подробного отображения обратнoзависимой части времятоковой характеристики).

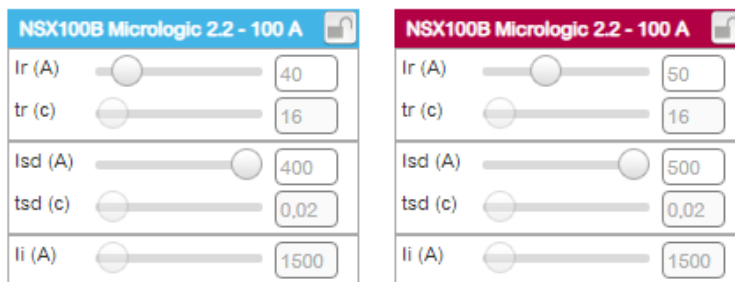


Рис. 8. Уставки расцепителей автоматических выключателей из рис. 7

Fig. 8. Circuit breaker release tripping devices settings, supplement to Fig. 7

Проведем сравнительный анализ рис. 6 и 7. Селективность выключателей с микропроцессорными расцепителями абсолютна при том же значении номинального тока расцепителя, что и у теплового расцепителя (100 А), т. е. нет необходимости в изменении типоразмера вышестоящего автоматического выключателя. При этом ток срабатывания защиты вышестоящего аппарата защиты меньше при применении микропроцессорных расцепителей в сравнении с тепловыми расцепителями: завышение тока срабатывания защиты не происходит, негативные последствия данного технического решения отсутствуют.

В рассмотренном примере токи срабатывания селективных защит отличаются в $50/40 = 1,25$ раза. Однако положительный эффект значительно усиливается при применении защитных устройств на большие токи [8–11] (рис. 9, 10). На рис. 10 уставка отсечки (I_{sd}) принята максимальной для подробного отображения обратнoзависимой части времятоковой характеристики. Согласно рис. 9, 10, токи срабатывания расцепителей автоматических выключателей отличаются в $630/536 = 1,17$ раза. Данная тенденция сохраняется и при дальнейшем увеличении значения уставки расцепителя нижестоящего автоматического выключателя.

Помимо описанного выше эффекта, автоматические выключатели с полупроводниковыми расцепителями обладают следующими преимуществами:

- наличием нескольких ступеней срабатывания защиты (до четырех), которые могут быть как обратнoзависимыми, так и дискретными;
- возможностью реализации защиты от однофазных коротких замыканий на корпус или на землю как одной из ступеней защиты для повышения чувствительности к минимальному току короткого замыкания;

- возможностью регулирования параметров срабатывания различных ступеней защиты выключателя (ток и время различных ступеней);
- возможностью реализации логических защит, логической селективности;
- наличием функции измерения электрических параметров (ток, напряжение, мощность, энергия, качество электрической энергии);
- возможностью передачи информации об электрических параметрах участка сети по цифровому каналу в систему диспетчеризации и сбора данных;
- наличием функции диагностики событий.

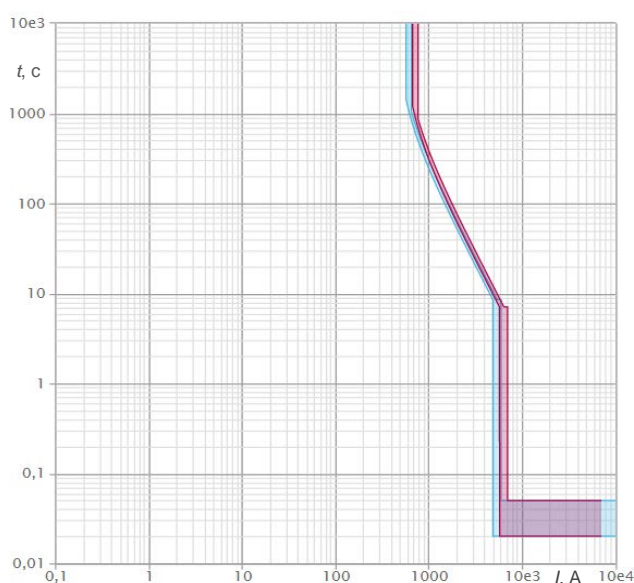


Рис. 9. Карта селективности двух трехполюсных автоматических выключателей Schneider Electric Compact NS630bH с микропроцессорными расцепителями Micrologic 2.0: синяя и красная области – нижестоящий и вышестоящий выключатели соответственно

Fig. 9. The two Schneider Electric Compact NSX630bH three-pole circuit breakers with microprocessor release tripping devices Micrologic 2.0 selectivity chart: blue and red areas are for a downstream and an upstream breaker, respectively

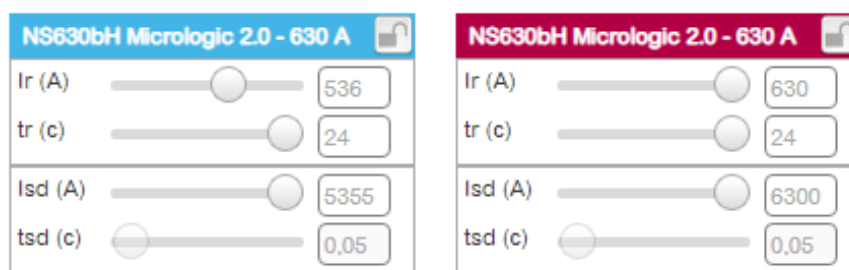


Рис. 10. Уставки расцепителей автоматических выключателей из рис. 9

Fig. 10. Circuit breaker release tripping devices settings, supplement to Fig. 9

Время срабатывания автоматического выключателя с полупроводниковыми или микропроцессорными расцепителями не зависит от температуры окружающей среды, что способствует более быстрому срабатыванию выключателя при включении на короткое замыкание (срабатывание из «холодного» состояния) [12]. Несмотря на множество достоинств данных устройств, их применение ограничивается высокой стоимостью и такими недостатками, как хрупкость и подверженность воздействию электромагнитных полей.

Стоит отметить, что для улучшения условий селективности путем применения расцепителя на базе микроконтроллера нет необходимости устанавливать дорогие решения с возможностью измерения параметров качества электроэнергии и передачи информации по цифровому каналу, а достаточно применения простейшего устройства, базирующегося на данном принципе.

ВЫВОДЫ

1. Требование селективности является одним из наиболее важных при построении схем электроснабжения. Селективность позволяет производить отключение только поврежденного участка электроустановки, сохраняя в работе большое количество параллельных цепей.

2. Применение автоматических выключателей с полупроводниковыми и микропроцессорными расцепителями для обеспечения селективности дает возможность увеличить чувствительность защит в сети до 1 кВ.

3. Рациональное использование автоматических выключателей с полупроводниковыми и микропроцессорными расцепителями способствует снижению стоимости распределительного устройства даже при условии большей стоимости единицы оборудования за счет экономии на типоразмере аппарата защиты и сечении кабельно-проводниковой продукции при необходимости защиты сети от перегрузок.

4. Координация автоматических выключателей с устройством защиты 6–10 кВ значительно упрощается, а чувствительность к коротким замыканиям увеличивается.

5. Измерительный орган микропроцессорного расцепителя автоматического выключателя в зависимости от конфигурации может определять значения тока, напряжения, мощности, потребленной электроэнергии и качество напряжения и быть подключен по цифровому каналу в систему диспетчеризации и сбора данных (SCADA) электроэнергетических процессов предприятия или автоматизированную систему технического учета электроэнергии. Эти преимущества в настоящее время наиболее часто применяются при защите генераторов собственных нужд мини-энергокомплексов [13], а также могут использоваться для создания сетей SMART GRID напряжением до 1 кВ [14]. В таких условиях данный тип расцепителя является комплексным решением, позволяющим сэкономить, избегая установки излишнего, дублирующего оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выключатели автоматические низковольтные. Общие технические условия: ГОСТ 9098–93. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: АО «ЭНАС», 1993. 20 с.
2. Acti 9. Эффективность, достойная Вас / Schneider Electric. 2019. 480 с.
3. Дополнительная техническая информация. Низкое напряжение / Schneider Electric, 2016. 260 с.
4. Низковольтное оборудование. Выключатели нагрузки до 4000 А [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://library.e.abb.com/public/7d10d20cd44acd254825794b0039535d/9CN D00000000346-4-5.pdf>. Дата доступа: 03.06.2021.
5. Правила устройства электроустановок / 6-е изд., перераб. и доп., с изм. М.: Энергоатомиздат, 1986. 648 с.
6. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловых и аккумуляторных, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний: ТКП 339–2011 (02230). Минск: Филиал «Информационно-издательский центр» ОАО «Экономэнергосбыт», 2011. 593 с.
7. Радкевич, В. Н. Электроснабжение промышленных предприятий / В. Н. Радкевич, В. Б. Козловская, И. В. Колосова. Минск: ИВЦ Минфина, 2017. 589 с.
8. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск № 4. Координация защит низкого напряжения. Руководство № 5 / Schneider Electric, 2006. 49 с.
9. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Ч. 2. Автоматические выключатели: ГОСТ ИЕС 60947-2-2014. Введ. 01.10.2016. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2016. 179 с.
10. Аппаратура малогабаритная электрическая. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения. Ч. 1. Автоматические выключатели для переменного тока: ГОСТ ИЕС 60898-1–2020. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2020. 124 с.
11. Выключатели автоматические для защиты от сверхтоков электроустановок бытового и аналогичного назначения. Ч. 2. Выключатели автоматические для переменного и постоянного тока: ГОСТ ИЕС 60898-2–2011. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2011. 16 с.
12. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин, В. В. Прокочник. Минск: Выш. шк., 1988. 357 с.
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>.
14. Фурсанов, М. И. Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 393–406. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406>.

Поступила 30.06.2021 Подписана в печать 20.08.2021 Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. State Standard 9098–93. *Low-Voltage Automatic Switches. General Specifications*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification: JSC “Electric Low-Voltage Devices and Systems”, 1993. 20 (in Russian).

2. Schneider Electric (2019) *Acti 9. Efficiency Worthy of You* [Electronic Resource]. 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).
3. Schneider Electric (2016) *Additional Technical Information. Low Voltage* [Electronic Resource]. Available at: https://p-te.ru/wp-content/uploads/2017/07/schneider-electric/katalog_tablicy_selektivnosti_koordinacii.pdf (in Russian).
4. *Low-Voltage Equipment. Load Switches up to 4000 A* [Electronic Resource]. Available at: <https://library.e.abb.com/public/7d10d20cd44acd254825794b0039535d/9CND00000000346-4-5.pdf> (in Russian).
5. *Rules for the Device of Electrical Installations. The Sixth Edition, Revised and Supplemented, with Changes*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 648 (in Russian).
6. TCP 339–2011 (02230). *Electrical Installations with a Voltage of up to 750 kV. Overhead Power Transmission Lines and Current Pipelines, Distribution and Transformer Substations, Electric Power and Battery Installations, Electrical Installations of Residential and Public Buildings. Rules of Arrangement and Protective Measures of Electrical Safety. Electricity Accounting. Standards of Acceptance Tests*. Minsk, The Branch “Information and Publishing Center” of the “Economenergo” JSC, 2011. 593 (in Russian).
7. Radkevich V. N., Kozlovskaya V. B., Kolosova I. V. (2017) *Power Supply of Industrial Enterprises*. Minsk, ICC of the Ministry of Finance. 589 (in Russian).
8. Schneider Electric (2006) *Schneider Electric Technical Collection. Iss. 4. Coordination of Low Voltage Protections. Manual 5* [Electronic Resource]. Available at: https://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/TechLibrary/Vipusk4-Koordinacia_zashit.pdf (in Russian).
9. State Standard IEC 60947-2–2014. *Low-Voltage Distribution and Control Equipment. Part 2. Circuit Breakers*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2016. 179 (in Russian).
10. State Standard IEC 60898-1–2020. *Electrical Accessories. Circuit-Breakers for Overcurrent Protection for Household and Similar Installations. Part 1. Circuit-Breakers for A.C. Operation*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2020. 124 (in Russian).
11. State Standard IEC 60898-2–2011. *Circuit-Breakers for Overcurrent Protection for Household and Similar Installations. Part 2. Circuit-Breakers for A.C. and D.C. Operation*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2011. 16 (in Russian).
12. Kudrin B. I., Prokopchik V. V. (1988) *Power Supply of Industrial Enterprises*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 357 (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).
14. Fursanov M. I. (2017) Circuit-Design Solutions and Information Support of City Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (5), 393–406. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406> (in Russian).