

Подбор предохранителей для фотоэлектрических систем согласно Национальным правилам эксплуатации электрических установок США (National Electrical Code®)

Раздел техники:
Защита фотоэлектрического оборудования
Бюллетень 5, выпуск 1

Роберт Лайонс, мл.
Менеджер по продукции

Самое важное:

- Требования по защите фотоэлектрических систем от условий перегрузки по току определены в статье 690.9(A) NEC. Предохранители должны защищать кабели и ФЭ модули от отказов напряжения между линейными проводниками, между линейным проводником и заземлением, а также отказов рассогласования.
- Для правильного подбора типоразмера предохранителей цепочечного и матричного типов для цепей фотоэлектрических источников и выходных фотоэлектрических цепей можно использовать следующую формулу, где I_{rated} — это требуемый паспортный номинал предохранителя по току, I_{SC} — это номинальный ток короткого замыкания ФЭ модуля или сумма номинальных токов короткого замыкания параллельных ФЭ модулей, а K_f — это температурный коэффициента снижения номинала (при необходимости):

$$I_{rated} = \frac{I_{SC} \times 1,56}{K_f}$$

Введение

Для безопасной, надежной и длительной эксплуатации данного источника возобновляемой электроэнергии крайне важно правильно подобрать предохранители для фотоэлектрических систем (ФЭ). В отличие от типовых сфер применения управления электроэнергией и ее распределения, предохранители в фотоэлектрических системах находятся в уникальных условиях. Длительное воздействие элементов окружающей среды может приводить к аномальным температурам окружающего воздуха, что, в свою очередь, влияет на характеристики предохранителя, выбор проводника и подбор типоразмера. Также, в отличие от традиционных цепей, для которых типоразмер обычно определяется на основе постоянных нагрузок, ФЭ модули генерируют непрерывные токи, что ведет к необходимости учитывать дополнительные факторы при подборе предохранителей. С учетом этих условий необходим уникальный метод подбора предохранителей для ФЭ систем. В следующей статье сначала определяется, когда необходима защита предохранителем, а затем приводится пятиэтапный процесс подбора токовых номиналов предохранителей для фотоэлектрического оборудования в соответствии с Национальными правилами эксплуатации электрических установок США (NEC) 2011 г.

Когда следует защищать, а когда — нет

Требования по защите фотоэлектрических систем от условий перегрузки по току определены в статье 690.9(A) NEC. Предохранители необходимы для защиты кабелей и ФЭ модулей. Единственная цель - предотвратить возгорание и безопасно разомкнуть цепь в случае скачка тока. Однако есть несколько ситуаций, в которых защита предохранителем вообще не нужна. Такие ситуации описаны ниже:

- **Одна последовательная цепочка (защита предохранителем не требуется)**
Статья 690.9(A), исключение «а», гласит, что для проводников цепи ФЭ модуля или ФЭ источника, к которым не подключены внешние источники (такие как цепи параллельно соединенных источников, аккумуляторы или обратное питание от инвертеров), защита предохранителем не требуется. Это справедливо, если подключенные кабели имеют номинал $1,56 \times I_{SC}$ или выше.
- **Две параллельные цепочки (защита предохранителем не требуется)**
Статья 690.9(A), исключение «b», гласит, что защита предохранителем не требуется, если токи короткого замыкания от всех источников не превышают емкости по току проводников или максимального типоразмера устройства защиты от перегрузки по току, указанного на паспортной табличке ФЭ модуля.

(продолжение на следующей странице)

При этом сценарии каждая цепочка модулей может генерировать максимальный ток цепи $1,25 \times I_{SC}$. Если номинал соединительных кабелей составляет $1,56 \times I_{SC}$ или выше, суммарный ток отказа цепи недостаточно велик, чтобы вызвать повреждение кабельной проводки или модулей, поэтому защита предохранителями не требуется.

Три или более параллельные цепочки (защита предохранителем требуется).

При этом сценарии отказ в одной цепочке приведет к максимальным токам цепей во всех других подключенных цепочках, где каждая цепочка в самых неблагоприятных условиях обеспечивает $1,25 \times I_{SC}$. Суммарные токи при отказе будут больше, чем ток, выдерживаемый установленной проводкой с типоразмером на $1,56 \times I_{SC}$, равно как и номинал серийного предохранителя ФЭ модулей. При таком состоянии отказа возможно повреждение и проводников, и модуля, поэтому правила эксплуатации требуют защиты предохранителем.

Пять этапов подбора предохранителей для фотоэлектрических систем

В соответствии с Национальными правилами эксплуатации электрических установок США 2011 г. подбор типов размеров предохранителей цепочечных и матричных типов для цепей фотоэлектрических источников и выходных фотоэлектрических цепей должен включать следующие этапы.

- Этап 1. Определение максимального тока цепи.
- Этап 2. Определение номинала предохранителя по току.
- Этап 3. Снижение номинала предохранителя из-за аномальной температуры окружающего воздуха (при необходимости).
- Этап 4. Определение номинала предохранителя по току на паспортной табличке.
- Этап 5. Проверка надлежащей защиты проводников предохранителем.

В данной статье подробно проанализирован каждый этап, а в итоговом разделе представлены общие расчеты. Для лучшего понимания терминов, применяемых в последующих расчетах, обратите внимание на рис. 1, который представляет собой упрощенную принципиальную схему включенной в сеть электроснабжения общего назначения типовой ФЭ системы с тремя или более параллельно включенными цепочками. Токи от I_{I+} до I_{n+} представляют цепи фотоэлектрических источников, а I_{PV+} представляет выходную фотоэлектрическую цепь. Определения терминов «цепь фотоэлектрического источника» и «выходная фотоэлектрическая цепь» указаны в описании этапа 1.

¹ В подобном бюллетене, не рассматриваемом в настоящей статье, показано, что флуктуация напряжения разомкнутой цепи модуля ФЭ (V_{oc}) зависит от температуры.

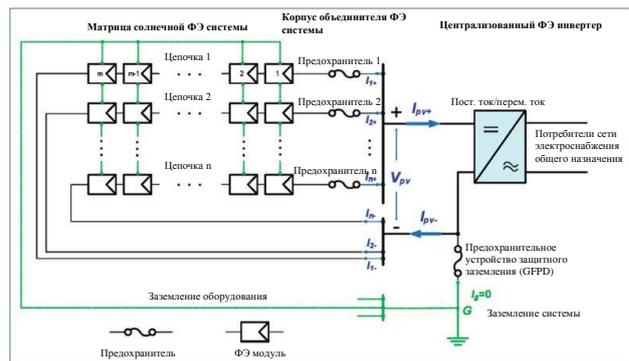


Рис. 1. Принципиальная схема включенной в сеть электроснабжения общего назначения типичной ФЭ системы при нормальных условиях

Этап 1. Определение максимального тока цепи (непрерывный ток)

В зависимости от интенсивности солнечного света возможны флуктуации тока короткого замыкания (I_{SC}) ФЭ модуля, в результате чего он может отличаться от номинала, указанного на паспортной табличке. Паспортные номиналы ФЭ модулей рассчитываются изготовителями в стандартных условиях испытаний (STC) при интенсивности излучения 1000 Вт/м^2 и температуре модуля 25°C . В условиях, когда интенсивность солнечного излучения выше, чем при STC, I_{SC} будет выше паспортного значения. И наоборот — в условиях, когда интенсивность солнечного излучения ниже, чем при STC, I_{SC} будет ниже паспортного значения¹. Мы рассчитаем предельный случай (самый неблагоприятный сценарий) максимального выходного тока цепи, который представляет собой значение, учитывающее как нормальное, так и ожидаемое интенсивности солнечного излучения, превышающее стандартное номинальное значение 1000 Вт/м^2 . На рис. 2 показан пример паспортной таблички ФЭ модуля. Обратите внимание на ссылку на стандартные условия испытания и указанное значение I_{SC} , которое будет использовано в расчете для этапа 1.

СОЛНЕЧНЫЙ МОДУЛЬ		
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАХОДЯТСЯ В ПРЕДЕЛАХ $\pm 10\%$ ОТ УКАЗАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ I_{SC} , V_{oc} И P_{max} ПРИ СТАНДАРТНЫХ УСЛОВИЯХ ИСПЫТАНИЙ (ИЗЛУЧЕНИЕ 1000 Вт/м^2 , СПЕКТР АМ1.5 И ТЕМПЕРАТУРА ЯЧЕЙКИ 25°C)		
МАКСИМАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ	(P_{max})	185,0 Вт
НАПЯЖЕНИЕ РАЗОМКНУТОЙ ЦЕПИ	(V_{oc})	44,9 В
ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	(I_{sc})	5,75 А
НАПЯЖЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ	(V_{pmax})	36,21 В
ТОК МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ	(I_{rmax})	5,11 А
МАКСИМАЛЬНОЕ НАПЯЖЕНИЕ СИСТЕМЫ		600 В
НОМИНАЛ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ		10 А
ПОЖАРООПАСНОСТЬ		КЛАСС С
КАБЕЛЬНАЯ ПРОВОДКА ПОДКЛЮЧЕНИЯ		ТОЛЬКО МЕДНАЯ, МИН. 14 AWG ИЗОЛИРОВАННАЯ ДЛЯ 90°C МИН.
СЕРИЙНЫЙ НОМЕР		

Рис. 2. Пример паспортной таблички ФЭ модуля

2 — RVPN5: Подбор предохранителей для фотоэлектрических систем согласно с Национальными правилами эксплуатации электрических установок США



Для наших расчетов согласно NEC токи ФЭ системы рассматриваются как непрерывные. Термин «непрерывный» означает поддерживаемый в течение свыше трех часов. На этом основании эксперты отрасли максимальный ток цепи иногда называют непрерывным током. Цепями ФЭ источников называются проводники между модулями и от модулей до общей точки подключения в системе постоянного тока². Выходными ФЭ цепями называются проводники тока между цепями ФЭ источников и инвертером или потребляющим оборудованием постоянного тока³.

Для цепей ФЭ источников раздел 690.8(A)(1) NEC гласит, что максимальный ток цепи (I_{max}), или непрерывный ток, определяется, как номинальный ток короткого замыкания ФЭ модуля (I_{SC}), умноженный на 1,25, либо как сумма номинальных токов короткого замыкания параллельных ФЭ модулей.

Для выходных ФЭ цепей раздел 690.8(A)(2) NEC гласит, что максимальный ток цепи (I_{max}), или непрерывный ток, должен быть суммой максимальных токов цепи параллельных источников, рассчитанных согласно 690.8(A)(1). Таким образом, для n цепочек уравнение для определения максимального тока цепи (I_{max}) имеет следующий вид:

$$I_{max} = (I_{SC1} + I_{SC2} + I_{SC3} + \dots + I_{SCn}) \times 1,25$$

Этап 2. Определение номинала предохранителя по току

Статья 690.8(B)(1)(a) NEC гласит, что предохранители (OCPD) должны выдерживать не меньше 125% максимального тока цепи (I_{max}), или непрерывного тока, рассчитанного согласно 690.8(A)(1), этап 1. Иными словами, OCPD не должны нагружаться непрерывно свыше 80% их паспортного номинала по току. Это обязательный фактор безопасности. Согласно Национальным правилам, проводники обычно не нагружаются на 100% — то же самое относится и к защите предохранителями. Таким образом, с использованием максимального тока цепи (I_{max}), рассчитанного на этапе 1, уравнение для определения номинала предохранителя по току (I_n) имеет следующий вид:

$$I_n = I_{max} \times 1,25$$

^{2,3} Национальные правила эксплуатации электрических установок США 2011 г., статья 690.2

Этап 3. Снижение номинала предохранителя из-за аномальной температуры окружающего воздуха (при необходимости)

Паспортный номинал предохранителя по току, как и у ФЭ модулей, рассчитывается изготовителем предохранителей в стандартных условиях испытаний при температуре окружающего воздуха 25°C. Раздел 690.8(B)(1)(c) NEC гласит, что если рабочая температура превышает 40°C (104°F), должны применяться поправочные температурные коэффициенты изготовителя. Предохранители — это чувствительные к температуре устройства. При длительном воздействии температуры окружающего воздуха выше 40°C, время плавления плавкого элемента предохранителя ускоряется, что может привести к нежелательным срабатываниям при значениях тока более низких, чем паспортный номинал. И наоборот — при длительном воздействии температуры окружающего воздуха ниже 0°C, время плавления плавкого элемента предохранителя замедляется. Компания «Mersen» дает следующие рекомендации.

1. Если предохранители установлены там, где температура превышает 40°C, попытайтесь установить их в тени или укройте их от солнца. Это усложнит воздействие тепла, и необходимость в применении поправочных коэффициентов может и не возникнуть.
2. Если температура превышает 40°C и вариант 1 недоступен, выясните длительность воздействия высокой температуры. Если высокая температура воздействует в течение 2 часов или меньше, необходимость в применении поправочных коэффициентов может и не возникнуть.
3. При самом неблагоприятном сценарии, если предохранители работают вне помещения и подвергаются воздействию прямых солнечных лучей, выдерживая температуры выше 40°C, может применяться поправочный коэффициент во избежание нежелательных срабатываний. В этом сценарии изготовитель предохранителей предоставляет рекомендованный график снижения номинала, показанный на рис. 3. Сначала определите нужный температурный коэффициент снижения номинала (K_f), найдя на горизонтальной оси длительную температуру окружающего воздуха, которой будет подвергаться предохранитель. После этого отложите по вертикали линию до пересечения с кривой снижения номинала. Из этой точки пересечения отложите по горизонтали линию до пересечения с осью Y. Значение на оси Y и является температурным коэффициентом снижения номинала (K_f). Разделите номинал предохранителя по току (I_n), рассчитанный на этапе 2, на коэффициент снижения номинала для определения сниженного номинала по току предохранителя (I_{rated}). Для температур окружающего воздуха, равных 25°C, $K_f = 1$.

3 — RVPN5: Подбор предохранителей для фотоэлектрических систем согласно с Национальными правилами эксплуатации электрических установок США

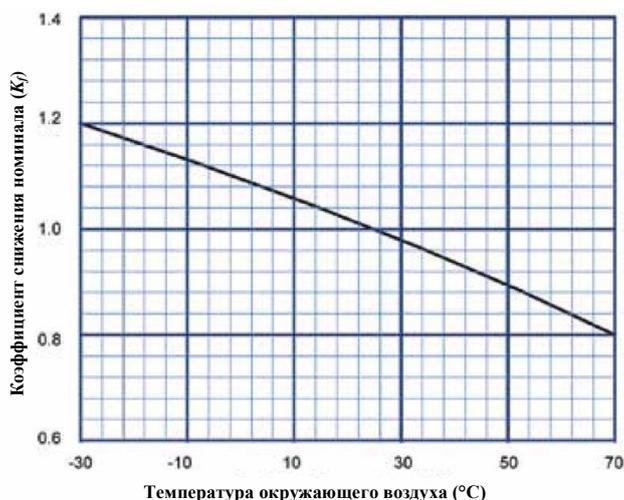


Рис. 3. График снижения номинала при аномальных температурах окружающего воздуха компании «Mersen»

$$I_{rated} = \frac{I_n}{K_f}$$

Примечание. Если применяется снижение номинала, паспортный номинал выбранного предохранителя не должен превышать емкости по току проводников, которые он защищает, или для цепей ФЭ источников; максимальный номинал серийных предохранителей согласно паспортной табличке модуля.

Этап 4. Определение номинала предохранителя по току для паспортной таблички

Если сниженный номинал по току предохранителя (I_{rated}) не является номиналом по току имеющихся в наличии предохранителей, раздел 690.8(B)(1)(d) разрешает выбрать следующий наивысший номинал из имеющихся в наличии. Например, если расчетный номинал предохранителя по току составляет 13,5 А, необходимо использовать предохранитель на 15 А, поскольку он является следующим наивысшим номиналом по току из имеющихся в наличии. К номиналам фотоэлектрических предохранителей по току, имеющимся в наличии, относятся 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500 и 600 А.

Этап 5. Проверка того, что предохранитель защищает проводники

Паспортный номинал предохранителя, с учетом всех корректировок на условия эксплуатации (этапы 3 и 4), должен быть меньше или равным емкости по току выбранного проводника. Если это не так, тогда сечение проводника должно быть увеличено с целью обеспечения безопасности.

Резюме

По итогам этапов с 1 по 5 можно применить следующую формулу для подбора надлежащего типоразмера для предохранителей цепочечного и матричного типов цепей фотоэлектрических источников и выходных фотоэлектрических цепей, где I_{rated} — это требуемый паспортный номинал предохранителя по току, I_{sc} — это номинальный ток короткого замыкания ФЭ модуля или сумма номинальных токов короткого замыкания параллельных ФЭ модулей, а K_f — это температурный коэффициент снижения номинала (при необходимости):

$$I_{rated} = \frac{I_{sc} \times 1,56}{K_f}$$

Если требуемое паспортное значение предохранителя (I_{rated}) не является имеющимся в наличии паспортным номиналом, допускается выбрать следующий имеющийся в наличии номинал. Итоговый расчетный паспортный номинал предохранителя должен быть меньше или равным емкости по току выбранного проводника. Если это не так, сечение проводника необходимо увеличить.

Пример

Давайте воспользуемся в качестве примера паспортной табличкой ФЭ модуля, приведенной на рис. 2. Номинальный ток короткого замыкания (I_{sc}) нашего ФЭ модуля составляет 5,75 А при максимальном напряжении системы в 600 В. Предположим также, что температура окружающего воздуха установки нашего примера составляет 50°C. Используя график снижения номинала и 50°C в качестве нашей температуры окружающего воздуха по оси X, мы можем рассчитать наш коэффициент снижения номинала (K_f), равный 0,90. Применив это к итоговому выражению, мы получаем следующее:

$$I_{rated} = \frac{5,75A \times 1,56}{0,9} = 9,97A$$

В данном примере 9,97 А не является уже имеющимся в наличии номиналом предохранителя по току. Национальные правила разрешают нам использовать следующий имеющийся в наличии номинал предохранителя по току, который составляет 10 А.

Ссылки

- Ирли, Марк У., ред. Пособие по Национальным правилам эксплуатации электрических установок США, 12-е изд., Куинси, Массачусетс: 2011 г.
- Уайлес, Джон. «Требования к OCPD последовательных цепочек для приложений инверторов, подключенных непосредственно к сетям электроснабжения общего назначения», «SolarPro Magazine», Декабрь/январь 2009 г.
- Уайлес, Джон. «Подбор типоразмера проводников и номиналы устройств защиты от перегрузки по току», «Home Power Magazine», Февраль/Март 2011 г.
- Уайлес, Джон. «Проектирование энергетических фотоэлектрических систем энергетической и Национальные правила эксплуатации электрических установок США 2005/2008/2011 г.» Семинар, организованный Центром образования по использованию энергии Солнца в сотрудничестве с Юго-западным институтом по развитию технологий и Инженерного колледжа штата Нью-Мексико. Сан-Франциско, Калифорния, 7-8 марта, 2011 г.

