

ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ (05.14.08)

УДК 621.311.29

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-49-58

Эффективность гетероструктурных фотоэлектрических модулей на территории России и корректность методики выбора защитных аппаратов в их цепях

Ю.В. Монаков, С.А. Шарапов, Д.Ю. Середкин

Цель настоящей работы — оценка эффективности фотоэлектрических модулей (ФЭМ) солнечных электростанций (СЭС) на территории Российской Федерации и анализ корректности принятой методики выбора защитных аппаратов в их цепях.

При проведении исследования использована расчетная модель солнечной электростанции, разработанная в программном обеспечении PV Syst с использованием базы метеоданных SolarGIS.

Выполнен анализ действующего ГОСТ Р 56978—2016 (IEC/TS 62548:2013) «Батареи фотоэлектрические. Технические условия», регламентирующего методику выбора защитных аппаратов в цепях ФЭМ, на предмет полноты учета факторов, влияющих на уровни токов в этих цепях.

В результате моделирования получены значения удельной вырабатываемой мощности и посчитаны коэффициенты использования установленной мощности (КИУМ) СЭС в различных регионах России. Они могут быть использованы при оценке целесообразности строительства СЭС на территории РФ, в том числе для собственных нужд потребителей, и необходимы при разработке/актуализации методики выбора защитных аппаратов в цепях ФЭМ.

По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о высокой эффективности работы ФЭМ на территории Российской Федерации и необходимости разработки методики выбора защитных аппаратов в цепях ФЭМ, учитывающей влияние уровня инсоляции, температуры и деградации модулей на уровни токов короткого замыкания в этих цепях.

Ключевые слова: ток короткого замыкания, фотоэлектрический модуль, защитные аппараты, солнечная электростанция, возобновляемые источники энергии.

Для цитирования: Монаков Ю.В., Шарапов С.А., Середкин Д.Ю. Эффективность гетероструктурных фотоэлектрических модулей на территории России и корректность методики выбора защитных аппаратов в их цепях // Вестник МЭИ. 2021. № 6. С. 49—00. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-49-58.

The Efficiency of Heterostructure Photovoltaic Modules in the Territory of Russia and Adequacy of the Procedure for Selecting Protective Devices in Their Circuits

Yu. V. Monakov, S. A. Sharapov, D. Yu. Seredkin

The aim of this study was to estimate the efficiency of photovoltaic modules (PVM) used at solar power plants (SPP) in the Russian Federation territory and to analyze how adequate the procedure adopted for selecting protective devices in the PVM circuits is.

In carrying out the study, a solar power plant analysis model developed in the PV Syst software environment using the SolarGIS weather database was used.

The currently effective State Standard GOST R 56978-2016 (IEC/TS 62548: 2013): Photovoltaic Arrays. Specifications, which stipulates the procedure for selecting protective devices in the PVM circuits, is analyzed for sufficiency of the considered in it factors influencing the levels of currents in these circuits.

Based on the modeling results, the values of the specific generated power were obtained, and the capacity utilization factor (CUF) values of SPPs were calculated for various regions of Russia.

The data obtained can be used in performing the feasibility studies of constructing solar power plants in the Russian Federation territory, including those to be used for the consumers own needs. This data may also be needed in elaborating/updating the methodology for selecting protective devices in the PVM circuits.

A conclusion can be drawn based on the obtained study results that the PVM operation features high efficiency in the Russian Federation territory. There is also a need to develop a procedure for selecting protective devices in the PVM circuits that would take into account the influence of insolation level, temperature and degradation of modules on the levels of short circuit currents in their circuits.

Key words: short circuit current, photovoltaic module, protective devices, solar power plant, renewable energy sources.

For citation: Monakov Yu.V., Sharapov S.A., Seredkin D.Yu. The Efficiency of Heterostructure Photovoltaic Modules in the Territory of Russia and Adequacy of the Procedure for Selecting Protective Devices in Their Circuits. Bulletin of MPEI. 2021;6:49—58. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-49-58.

Введение

В настоящее время стремительно развивается солнечная энергетика. Согласно данным Международного энергетического агентства (МЭА) по фотоэлектрическим энергосистемам (Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS)), к началу 2020 г. установленная мощность солнечных электростанций в мире достигла 623 ГВт (из них в России всего 1,16 ГВт) [1]. По данному показателю солнечная энергетика уже обошла атомную (400 ГВт установленной мощности) [2]. Данное направление демонстрирует быстрые темпы развития во многих странах. Например, в США за последние 10 лет среднегодовые темпы роста солнечной энергетики достигли 49% [3].

По прогнозу устойчивого развития МЭА ожидается, что именно фотоэлектрические установки станут основным источником электроэнергии к 2040 г. (рис. 1) [4].

В России масштабы использования солнечной энергетики пока невелики. Согласно данным Минэнерго в России к 2024 г. планируется построить 57 солнечных электростанций общей мощностью 1,5 ГВт.

Значения токов короткого замыкания в цепях фотоэлектрических модулей (ФЭМ) близки к значениям рабочих токов, при этом данные токи существенно

зависят от условий эксплуатации (температуры, освещенности, состояния модулей). Это значительно затрудняет выбор защитного оборудования, необходимого для своевременного устранения аварийных ситуаций, способных привести к существенным потерям электроэнергии. Поскольку солнечная энергетика как отрасль электроэнергетики России возникла не так давно, существуют проблемы недостаточной изученности данной отрасли и адаптации зарубежной нормативно-технической документации.

В связи со стремительным развитием солнечной энергетики и отсутствием данных по эффективности работы современных ФЭМ в различных регионах Российской Федерации существует проблема оценивания целесообразности использования фотоэлектрических модулей. Из-за отсутствия апробации принятой методики выбора защитного оборудования в цепях ФЭМ на территории РФ возникают трудности анализа корректности данной методики, особенно в условиях низкого уровня инсоляции.

Для решения данных вопросов были проведены:

- анализ факторов, стимулирующих развитие солнечной энергетики в России;
- разработка расчетной модели фотоэлектрической установки и последующая оценка эффективности работы ФЭМ в различных регионах РФ;

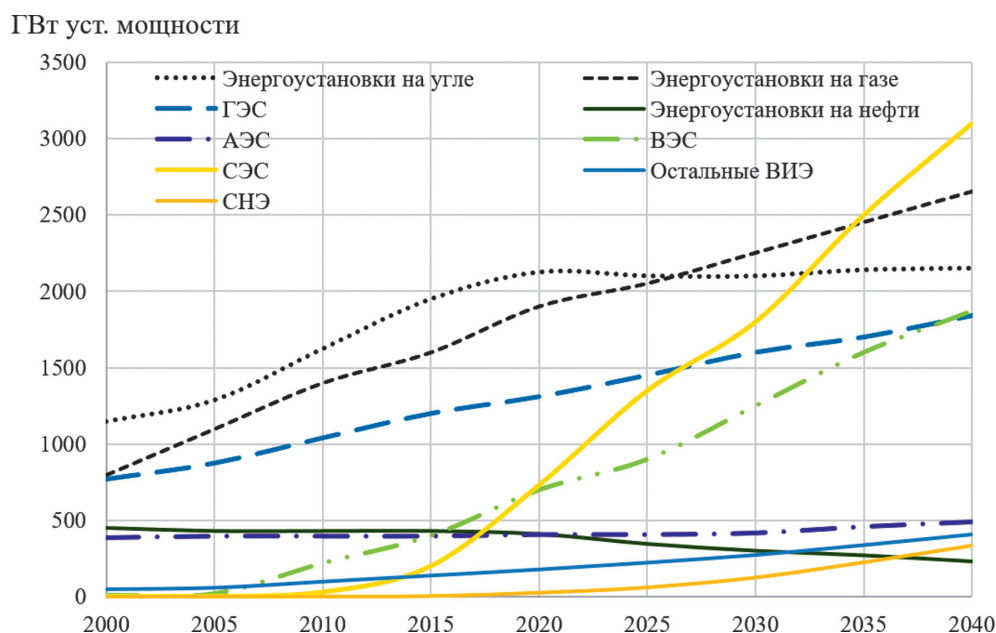


Рис. 1. Прогнозируемое изменение установленной мощности энергетических установок по сценарию устойчивого развития до 2040 г.

- оценка факторов, влияющих на уровни токов в цепях фотоэлектрических модулей;
- анализ методики выбора защитных аппаратов от сверхтоков в цепях ФЭМ, регламентируемой действующим ГОСТ Р 56978—2016 (IEC/TS 62548:2013) «Батареи фотоэлектрические. Технические условия».

Современное состояние и прогнозы развития солнечной энергетики в мире и России

По данным МЭА, установленная мощность солнечных электростанций в мире с 2010 по 2020 г. увеличилась более чем на 700 ГВт [5]. Согласно прогнозу [6], установленная мощность энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) превысит установленную мощность электроустановок на природном газе и угле в 2024 г. В пользу данного прогноза говорит и статистика: в последние годы мощность ВИЭ составляет существенную часть от вводимых генерирующих мощностей (табл. 1).

Доля выработки электроэнергии на солнечных электростанциях (СЭС) в мировом энергобалансе на сегодняшний день составляет около 3% от мирового производства, в то время как в России данный показатель не превышает 0,3%.

Тенденция развития ВИЭ не может не затронуть российскую энергетику: одним из стимулирующих факторов развития ВИЭ является Парижское соглашение по климату, принятое 12 декабря 2015 г. и подписанное от имени Российской Федерации в соответствии с распоряжением Правительства № 670-р от 14 апреля 2016 г. По данному соглашению Россия должна достичь выброса парниковых газов не более 70% от уровня 1990 г. к 2030 г.

В настоящее время СЭС в РФ строят по гарантирующим возврат инвестиций договорам предоставления мощности, но даже при полной реализации программы

Таблица 1

Прирост установленных мощностей энергоустановок на базе ВИЭ в 2010 — 2020 гг.

Год	ВИЭ, ГВт	Процент от всей введенной мощности
2010	48	18
2011	70	25
2012	77	27
2013	70	27
2014	89	30
2015	117	36
2016	126	40
2017	143	46
2018	146	47
2019	168	54
2020	160	57

поддержки, согласно Распоряжению Правительства Российской Федерации № 1-р от 08.01.2009 г., к 2024 г., доля ВИЭ в энергобалансе России составит всего 1%. Если сравнить этот показатель в 2020 г. с другими странами (Германия — 36,5%, США — 16%, Китай — 16%), то можно сделать вывод об отставании российской энергетики от ведущих стран в данной отрасли (рис. 2) [7].

Связано это, в первую очередь, с тем, что во многих странах сетевой паритет по СЭС (равная цена приведенной стоимости СЭС и традиционной генерации) достигнут [8], в то время как в России, согласно оценке НП «Совет Рынка» [9], достижение сетевого паритета можно ожидать только к 2031 г. (рис. 3). Правительством РФ подготовлены проекты нормативных изменений, направленных на продление программы под-

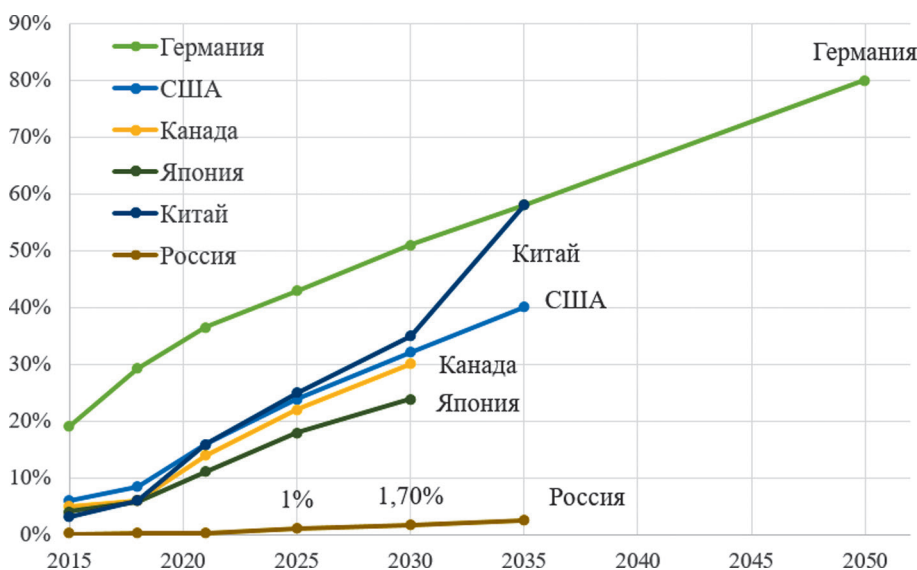


Рис. 2. Доля ВИЭ в энергобалансах стран

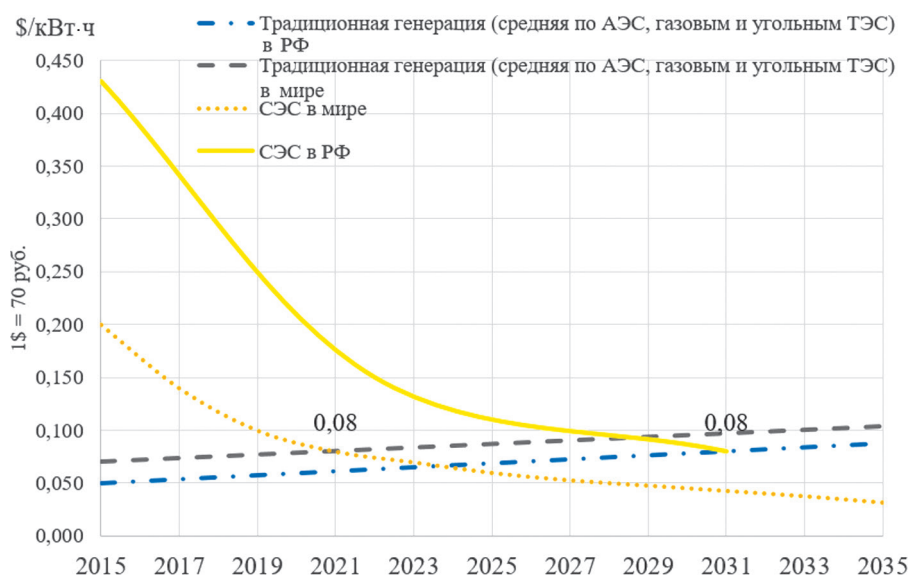


Рис. 3. Динамика изменения приведенной стоимости электроэнергии СЭС и традиционной генерации в мире и в РФ

держки ВИЭ в 2025 — 2035 гг., поскольку без данных изменений отставание российской отрасли ВИЭ будет только расти. По оценке Минэнерго реализация данных проектов сделает российскую отрасль ВИЭ конкурентоспособной как на внутреннем, так и на мировых рынках уже к 2036 г.

Оценка эффективности работы фотоэлектрических модулей на территории Российской Федерации

Для оценки эффективности работы ФЭМ использована расчетная модель СЭС (рис. 4), выполненная в программном обеспечении PVsyst, специализирующемся на расчете фотоэлектрических систем.

Основные параметры СЭС

Номинальная мощность ФЭМ, МВт 20
 Номинальная мощность инверторного оборудования, МВА 18,75
 Централизованный инвертор, кВА 6×3125
 Ориентация Юг

Угол наклона ФЭМ 35°
 Расстояние между рядами столов ФЭМ, м 11
 Количество ФЭМ, шт. 60610
 Тип ФЭМ Hevel HJT 330
 Занимаемая площадь, м² 400000

Основные технические характеристики фотоэлектрического модуля Hevel HJT 330 при стандартных условиях испытания (СУИ) и температуре при нормальных условиях эксплуатации

Ток в рабочей точке $P_{\max} I_{\text{ТММ}}$, А 8,97
 Напряжение в рабочей точке $P_{\max} V_{\text{ТММ}}$, В 36,84
 Ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$, А 9,48
 Напряжение холостого хода $V_{\text{хх}}$, В 44,18
 Максимальное напряжение системы, В 1500
 Технология модуля Гетероструктурная
 Температурный коэффициент $V_{\text{хх}}$, %/°C -0,244
 Температурный коэффициент $I_{\text{кз}}$, %/°C 0,055
 Температурный коэффициент P_{\max} , %/°C -0,285
 Коэффициент полезного действия, % 19,7
 Температура при нормальных условиях эксплуатации $N_{\text{ОСТ}}$ °C 38,8°C

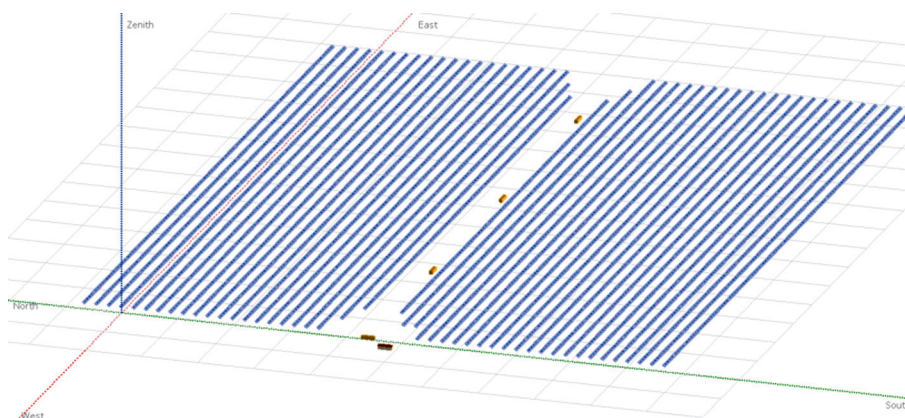


Рис. 4. 3D-модель солнечной электростанции

Следует отметить, что угол наклона 35° не является оптимальным для ряда регионов.

Показатели СУИ отражают работу ФЭМ в идеальных условиях:

- температура фотоэлектрического модуля — 25°C ;
- освещенность — 1000 Вт/м^2
- скорость ветра равна нулю;
- полный спектр излучения соответствует массе воздуха 1,5 (это соответствует спектру солнечного света и уровню освещенности, падающим на поверхность, направленную на юг под углом к горизонту 37° при высоте солнца над уровнем горизонта $41,81^\circ$).

Для объективной оценки влияния реальных условий работы на выработку ФЭМ введены дополнительные параметры. Так, появилось понятие NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), т. е. температуры модуля при нормальных условиях эксплуатации.

NOCT измеряется при температуре воздуха 20°C и освещении фотоэлектрического модуля солнечным светом интенсивностью 800 Вт/м^2 .

Однако СУИ и NOCT не отражают производительности и эффективности ФЭМ в реальных условиях, поэтому всё ещё предпринимаются попытки поиска показателей, при которых параметры модуля будут приближены к реальным.

В таблице 2 приведены результаты оценочных расчетов выработки СЭС на территории РФ с односторонними ФЭМ российского производства HVL-330/НТ. При выборе базового населенного пункта были взяты либо пункты в южной области рассматриваемого реги-

она (за исключением горных областей), либо пункты со средним значением годовой инсоляции по региону. Все расчеты выполнены на базе метеоданных SolarGIS [10].

Результаты расчетов показали, что, несмотря на распространенное мнение о малой эффективности использования ФЭМ из-за климатических особенностей России, на территории РФ существует достаточно много мест, где выгодно преобразовывать солнечную энергию в электроэнергию с достаточно высокими коэффициентами использования установленной мощности (для сравнения в Германии средний КИУМ фотоэлектрической генерации составляет 10...13%, в Нидерландах, где доля выработки электроэнергии на СЭС в энергобалансе страны 2,7%, — 11%) [11, 12]. Что касается северных регионов России, то даже там КИУМ не опускается ниже 11,8...12,0%. Это позволит решить проблему электроснабжения удаленных и изолированных районов, таких как Чукотский автономный округ, Камчатский край, Сахалинская и Магаданская области, Норильско-Таймырский и Николаевский энергорайоны, энергосистемы северной части Республики Саха (Якутия).

Обзор действующего стандарта, регламентирующего выбор защитных аппаратов в цепях фотоэлектрических модулей

Как уже отмечалось ранее, солнечная энергетика — молодое направление для российской электроэнергетики (первая фотоэлектрическая станция мощностью 0,1 МВт была введена в эксплуатацию в 2010 г.),

Таблица 2

КИУМ в различных регионах РФ по результатам расчетов

Регион РФ	Населенный пункт (базовый расчет)	Удельная выработка, кВт·ч/кВт/г	КИУМ, %
Республика Алтай	Курай	1575,0	17,98
Республика Тыва	Кызыл	1306,0	14,91
Алтайский край	Угловское	1265,0	14,44
Челябинская область	Бреды	1203,0	13,73
Астраханская область	Нариманов	1339,0	15,29
Республика Хакасия	Саяногорск	1218,0	13,90
Республика Калмыкия	Светлый	1283,0	14,65
Новосибирская область	Сузун	1206,0	13,77
Республика Дагестан	Кумторкалинский район	1321,0	15,08
Республика Адыгея	Майкоп	1287,0	14,69
Краснодарский край	Северская	1275,0	14,55
Оренбургская область	Домбаровский	1246,0	14,22
Забайкальский край	Борзя	1618,0	18,47
Саратовская область	Орлов Гай	1230,0	14,04
Республика Бурятия	Дырестуйское сельское поселение	1499,0	17,11
Волгоградская область	Ленинск	1273,0	14,53
Ростовская область	Ростов-на-Дону	1287,0	14,69
Красноярский край	Верхний Кужебар	1228,0	14,02
Иркутская область	п.г.т. Тыреть 1-ая	1364,0	15,57

и существуют проблемы адаптации/актуализации и недостаточно детальной проработки зарубежных нормативных документов и стандартов, предъявляющих обоснованные требования к объектам солнечной энергетики.

Так, в ГОСТ Р 56978—2016 (IEC/TS 62548:2013) «Батареи фотоэлектрические. Технические условия» рассмотрены системы с напряжением до 1000 В и фотоэлектрические модули (ФЭМ) из моно- и поликристаллического кремния, а гетероструктурные фотоэлектрические модули с высоким КПД и низкой деградацией и более современные системы на 1500 В не упомянуты. Однако, именно гетероструктурные ФЭМ широко применяют в РФ за счет большей выработки при низких температурах и наличия собственного производства в г. Новочебоксарске российской группой компаний «Хевел», объем выпуска которой достиг 340 МВт/г в 2020 г.

В данном нормативном документе указано, что аварийные токи ФЭМ могут незначительно превосходить номинальный рабочий ток и не вызывать срабатывания аппаратов защиты. Это следует из вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФЭМ, из которой видно, что ток короткого замыкания незначительно превышает ток в точке максимальной мощности (ТММ) (рис. 5). Поэтому требуется существенно более точный подбор аппаратов защиты, т. к. при неправильном подборе существует вероятность либо отсутствия реагирования аппаратов защиты на наличие аварийной ситуации, либо их срабатывание в нормальном режиме работы СЭС.

Наиболее распространённые повреждения в цепях фотоэлектрических модулей — замыкание на землю, короткое замыкание, обрыв цепи и повреждения, связанные с различием электрических параметров модулей (вследствие затенения) [14]. Первые два вида повреждения считают основной причиной возникновения сверхтоков.

Что касается обеспечения защиты от сверхтоков, то данный ГОСТ предъявляет следующие требования:

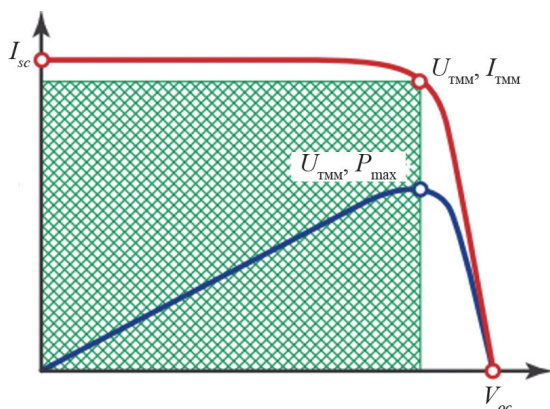


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика и кривая мощности фотоэлектрического модуля [13]

«...защита от сверхтоков должна быть выполнена в соответствии с настоящим стандартом, правилами устройства электроустановок (ПУЭ), ГОСТ Р 50571.4.43—2012/МЭК 60364-4-43:2008 Электроустановки низковольтные. Часть 4-43. Требования по обеспечению безопасности. Защита от сверхтока (с Поправкой) и требованиями изготовителя ФЭМ».

Наиболее широко применяемые и надежные аппараты для защиты от сверхтоков в цепях постоянного тока — предохранители, причем для фотоэлектрических установок используют специальный тип «gPV», адаптированный к низким токам перегрузки. ГОСТ Р 56978—2016 (IEC/TS 62548:2013) предлагает руководствоваться следующими формулами при выборе аппаратов защиты от сверхтоков.

Для защиты каждой цепочки фотоэлектрических модулей:

$$1,5I_{\text{кзсуи}} < I_{\text{ном.ап}} < 2,4I_{\text{кзсуи}}$$

где $I_{\text{кзсуи}}$ — ток короткого замыкания фотоэлектрического модуля при стандартных условиях испытания; $I_{\text{ном.ап}}$ — номинальный ток защитного аппарата.

Для защиты нескольких параллельно соединенных цепочек общим аппаратом защиты от сверхтоков:

$$1,5N_{\text{ц}}I_{\text{кзсуи}} < I_{\text{ном.ап}} < I_{\text{сзт}} - (N_{\text{ц}} - 1)I_{\text{кзсуи}}$$

при условии, что

$$I_{\text{сзт}} > 4I_{\text{кзсуи}}$$

где $N_{\text{ц}}$ — количество параллельных фотоэлектрических цепочек; $I_{\text{сзт}}$ — значение номинального тока защиты от сверхтоков/значение максимально допустимого обратного тока (данная величина указывается производителем ФЭМ в паспортных данных как «Max. Series Fuse Rating» и обычно составляет порядка $2I_{\text{кзсуи}}$. Рекомендации для данного случая в стандарте не приводятся).

Стоит отметить, что указанные нормативные документы не учитывают особенностей работы ФЭМ, в них не рассмотрены сценарий деградации ФЭМ, при котором следует учесть снижение токов короткого замыкания (ТКЗ) со временем эксплуатации ФЭМ, влияние температуры модуля и уровня инсоляции на уровень токов от ФЭМ.

При игнорировании данных факторов возникают аварийные ситуации, при которых выбранные по ГОСТ защитные аппараты либо не будут реагировать на них в цепях фотоэлектрических модулей, что может привести к работе всей или части СЭС в режиме короткого замыкания и значительным потерям электроэнергии, либо излишне срабатывать при высокой температуре модулей [15].

Таким образом, перед специалистами российской солнечной энергетики возникает проблема актуализации/разработки методики выбора защитных аппаратов в цепях фотоэлектрических модулей солнечных электростанций с учетом множества факторов.

Факторы, влияющие на токи фотоэлектрических модулей

Следует дать определение току короткого замыкания ФЭМ, поскольку термины «ток короткого замыкания фотоэлектрического модуля» и «ток короткого замыкания» принципиально отличаются.

Ток короткого замыкания ФЭМ — ток, протекающий через модуль при нулевом напряжении [16]. Он возникает в результате генерации и разделения сгенерированных светом носителей. Для идеального солнечного модуля ток короткого замыкания равен световому, т. е. току в ТММ. Следовательно, ТКЗ ФЭМ — максимальный ток, который может быть получен от ФЭМ. В паспорте ФЭМ производители указывают значение тока КЗ при СУИ.

Основной сложностью при выборе защитных аппаратов в цепях ФЭМ является зависимость тока от следующих факторов:

- количества падающих фотонов, т. е. от освещенности или уровня инсоляции ($\text{Вт}/\text{м}^2$), существенно меняющейся в течение дня (рис. 6) [17];
- температуры модуля, значение которой при эксплуатации значительно отличается от $25\text{ }^\circ\text{C}$ [18];
- деградации модуля, т. е. ухудшения характеристик со временем службы.

В технических параметрах модуля для отражения зависимости тока от температуры производителями указывается температурный коэффициент $\text{TK}(I)$, $\%/^\circ\text{C}$. Зная его, можно вычислить значение тока при любой температуре T_i [19]:

$$I_{\text{КЗ}i} = \frac{(T_i - 25)\text{TK}(I)}{100\%} I_{\text{КЗ}} + I_{\text{КЗ}}.$$

Влияние данного фактора на значение тока КЗ не так существенно, как влияние деградации и уровня

инсоляции. Например, увеличение температуры рассматриваемого ФЭМ до максимально допустимого значения, равного 85° , вызывает увеличение тока КЗ на 0,35%.

Повреждения в цепях ФЭМ могут быть причиной существенных потерь электроэнергии и являются трудно обнаруживаемыми. Существующие исследования рассматривают повреждения в цепях ФЭМ при солнечных днях [20], но не затрагивают сценарий деградации ФЭМ и повреждения при облачных или зимних днях, наиболее характерных для большей части территории РФ, когда уровень инсоляции существенно ниже (рис. 7, 8), а, следовательно, и ниже уровни токов ФЭМ.

В целом, неисправности ФЭМ, в зависимости от длительности их существования, можно разделить на две группы: кратковременные и продолжительные. К кратковременным относят затенение и загрязнение ФЭМ, а к продолжительным — деградацию, короткое замыкание, холостой ход и замыкание на землю.

Кратковременные неисправности существуют короткий промежуток времени и могут быть устранены самостоятельно с течением времени или при вмешательстве персонала. Обе группы неисправностей уменьшают выработку СЭС, но при возникновении продолжительных неисправностей вероятность повреждения оборудования существенно выше. Следовательно, данные повреждения должны быть обнаружены и устранены как можно быстрее, и именно для их своевременного устранения защитными аппаратами существует необходимость пересмотра методики их выбора.

Заключение

Разработана расчетная модель СЭС, с помощью которой оценена эффективность фотоэлектрических мо-

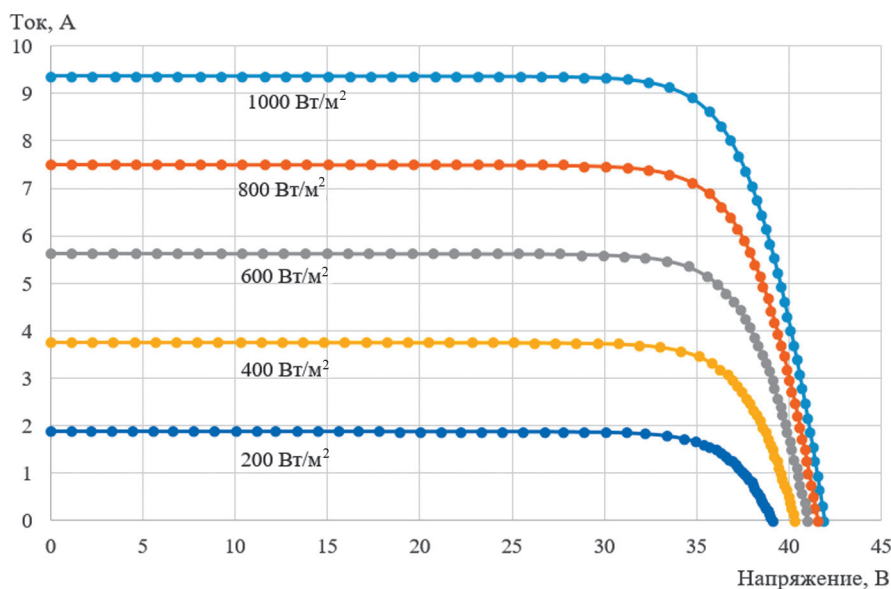


Рис. 6. Зависимости ВАХ ФЭМ Nevel NJT 330 от уровня инсоляции

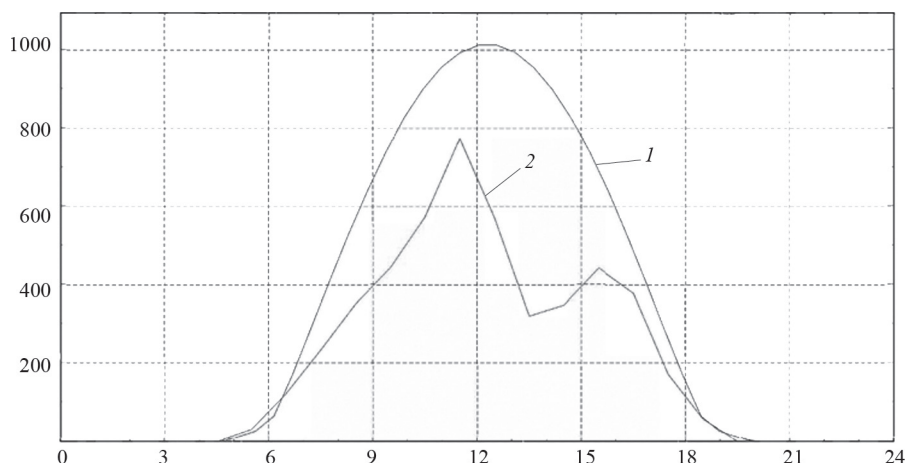


Рис. 7. Сравнение инсоляций при ясном (1) и облачном (2) небе в г. Ростов-на-Дону летом (03.06.2020 г.)

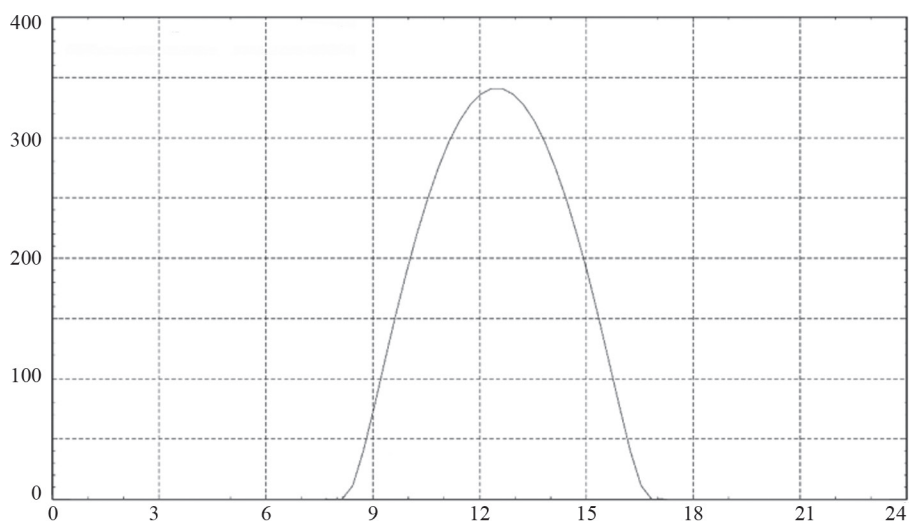


Рис. 8. Инсоляция при ясном небе в г. Ростов-на-Дону зимой (14.01.2020 г.)

дулей в различных регионах России, а также рассмотрены факторы, не учитываемые в принятой методике при выборе защитных аппаратов в цепях ФЭМ.

Планируются дальнейшая разработка и верификация модели для расчета электромагнитных переходных процессов в цепях ФЭМ с целью оценки воздействия данных факторов на уровни токов КЗ. Особый интерес вызывают повреждения при низком уровне инсоляции, когда выбранные по ГОСТ защитные аппараты не могут устранить данные повреждения из-за низких уровней токов.

Таким образом, приведены и рассмотрены тенденции и прогнозы дальнейшего развития СЭС в мире и в Российской Федерации и стимулирующие факторы: Парижское соглашение по климату, достижение сетевого

паритета СЭС, поддержка развития российской возобновляемой энергетики государственными органами.

Создана модель СЭС, позволяющая рассчитывать выработку электроэнергии.

Выполнены оценочные расчеты выработки в различных регионах РФ, доказывающие эффективность работы ФЭМ.

Указаны недочеты и необходимость актуализации/переработки действующего стандарта, регламентирующего выбор защитных аппаратов в цепях фотоэлектрических модулей.

Изучены факторы, влияющие на уровни токов в цепях ФЭМ, которые необходимо учитывать при выборе защитных аппаратов. Дана классификация неисправностей ФЭМ.

Литература

1. **IEA PVPS.** Trends in Photovoltaic Applications 2020 [Электрон. ресурс] www.iaea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/11/IEA_PVPS_Trends_Report_2020-1.pdf (дата обращения 03.12.2020).

References

1. **IEA PVPS.** Trends in Photovoltaic Applications 2020 [Elektron. Resurs] www.iaea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/11/IEA_PVPS_Trends_Report_2020-1.pdf (Data Obrashcheniya 03.12.2020).

2. **World Nuclear Performance Rep.** 2019 [Электрон. ресурс] www.world-nuclear.org/getmedia/d77ef8a1-b720-44aa-9b87-abf09f474b43/performance-report-2019.pdf.aspx (дата обращения 01.11.2020).
3. **Solar Energy Industries Association** [Официальный сайт] www.seia.org/solar-industry-research-data (дата обращения 05.01.2021).
4. **IEA.** Installed Power Generation Capacity by Source in the Stated Policies Scenario, 2000—2040 [Электрон. ресурс] www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-by-source-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040 (дата обращения 10.10.2020).
5. **IEA.** Global Solar PV and Wind Power Capacity Additions, 2010—2020 [Электрон. ресурс] www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-solar-pv-and-wind-power-capacity-additions-2010-2020e (дата обращения 15.10.2020).
6. **IEA.** Renewables 2020 [Электрон. ресурс] / www.iea.org/reports/renewables-2020 (дата обращения 10.01.2021).
7. **IRENA.** Final Renewable Energy Consumption 2020. International Renewable Energy Agency [Электрон. ресурс] www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Renewable-Energy-Balances/Final-Renewable-Energy-Consumption (дата обращения 11.12.2020).
8. **IRENA.** Solar Costs 2020. [Электрон. ресурс] www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Solar-Costs (дата обращения 02.05.2021).
9. **Годовой отчет** о деятельности ассоциации «НП Совет рынка» за 2018 г. [Электрон. ресурс] www.np-sr.ru/sites/default/files/go_2018_god_.pdf (дата обращения 15.10.2020).
10. **SolarGIS** [Официальный сайт] www.solargis.com (дата обращения 15.11.2020).
11. **Recent Facts about Photovoltaics in Germany** [Электрон. ресурс] www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/recent-facts-about-pv-in-germany.html (дата обращения 15.03.2021)
12. **Jäger-Waldau A.** PV Status Rep. Luxembourg: Office of the European Union, 2019.
13. **Бессель В.В., Кучеров В.Г., Мингалеева Р.Д.** Изучение солнечных фотоэлектрических элементов. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2016.
14. **Davarifar M., Rabhi A., El Hajjaji A.** Comprehensive Modulation and Classification of Faults and Analysis Their Effect in DC Side of Photovoltaic System // Energy and Power Eng. 2013. V. 5. Pp. 230—236.
15. **Hariharan R., Chakkarapani M., Saravana Pango G., Nagamani C.** A Method to Detect Photovoltaic Array Faults and Partial Shading in PV Systems // IEEE J. Photovoltaics. 2016. V. 6. No. 5. Pp. 1278—1285.
16. **Какурина Н.А., Какурин Ю.Б., Курсай Д.Е., Осипов Н.А.** Исследование электрофизических харак-
2. **World Nuclear Performance Rep.** 2019 [Elektron. Resurs] www.world-nuclear.org/getmedia/d77ef8a1-b720-44aa-9b87-abf09f474b43/performance-report-2019.pdf.aspx (Data Obrashcheniya 01.11.2020).
3. **Solar Energy Industries Association** [Ofits. Sayt] www.seia.org/solar-industry-research-data (Data Obrashcheniya 05.01.2021).
4. **IEA.** Installed Power Generation Capacity by Source in the Stated Policies Scenario, 2000—2040 [Elektron. Resurs] www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-by-source-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040 (Data Obrashcheniya 10.10.2020).
5. **IEA.** Global Solar PV and Wind Power Capacity Additions, 2010—2020 [Elektron. Resurs] www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-solar-pv-and-wind-power-capacity-additions-2010-2020e (data Obrashcheniya 15.10.2020).
6. **IEA.** Renewables 2020 [Elektron. Resurs] / www.iea.org/reports/renewables-2020 (Data Obrashcheniya 10.01.2021).
7. **IRENA.** Final Renewable Energy Consumption 2020. International Renewable Energy Agency [Elektron. Resurs] www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Renewable-Energy-Balances/Final-Renewable-Energy-Consumption (Data Obrashcheniya 11.12.2020).
8. **IRENA.** Solar Costs 2020. [Elektron. Resurs] www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Solar-Costs (Data Obrashcheniya 02.05.2021).
9. **Godovoy Otchet** o Deyatel'nosti Assotsiatsii «NP Sovet Rynka» za 2018 g. [Elektron. Resurs] www.np-sr.ru/sites/default/files/go_2018_god_.pdf (Data Obrashcheniya 15.10.2020). (in Russian).
10. **SolarGIS** [Ofits. Sayt] www.solargis.com (Data Obrashcheniya 15.11.2020).
11. **Recent Facts about Photovoltaics in Germany** [Elektron. Resurs] www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/recent-facts-about-pv-in-germany.html (Data Obrashcheniya 15.03.2021)
12. **Jäger-Waldau A.** PV Status Rep. Luxembourg: Office of the European Union, 2019.
13. **Bessel' V.V., Kucherov V.G., Mingaleeva R.D.** Izuchenie solnechnykh Fotoelektricheskikh Elementov. M.: Izd. Tsentr RGU Nefti i Gaza im. I.M. Gubkina, 2016. (in Russian).
14. **Davarifar M., Rabhi A., El Hajjaji A.** Comprehensive Modulation and Classification of Faults and Analysis Their Effect in DC Side of Photovoltaic System. Energy and Power Eng. 2013;5:230—236.
15. **Hariharan R., Chakkarapani M., Saravana Pango G., Nagamani C.** A Method to Detect Photovoltaic Array Faults and Partial Shading in PV Systems. IEEE J. Photovoltaics. 2016;6;5:1278—1285.
16. **Kakurina N.A., Kakurin Yu.B., Kursay D.E., Osipov N.A.** Issledovanie Elektrofizicheskikh Kharak-

теристик солнечной панели с помощью компьютеризированного измерительного стенда // Инженерный вестник Дона. 2016. № 3(42). С. 1—10.

17. **Dash S. e. a.** A Comprehensive Assessment of Maximum Power Point Tracking Techniques under Uniform and Non-uniform Irradiance and its Impact on photovoltaic Systems: a Review // J. Renewable and Sustainable Energy. 2015. V. 7(6). P. 063113.

18. **Haber I., Farkas I.** Combining CFD Simulations with Blockoriented Heatflow-network Model for Prediction of Photovoltaic Energy-production // J. Physics: Conf. Series. 2011. V. 268(1). P. 012008.

19. **Vergura S.** A Complete and Simplified Datasheet-Based Model of PV Cells in Variable Environmental Conditions for Circuit Simulation // Energies. 2016. V. 9(5). Pp. 326—337.

20. **Alam M.K., Khan F., Johnson J., Flicker J.** A Comprehensive Review of Catastrophic Faults in PV Arrays: Types, Detection, and Mitigation Techniques // IEEE J. Photovoltaics. 2015. V. 5. No. 3. Pp. 982—997.

teristik Solnechnoy Paneli s Pomoshch'yu Komp'yuterizirovannogo Izmeritel'nogo Stenda. Inzhenernyy Vestnik Dona. 2016;3(42):1—10. (in Russian).

17. **Dash S. e. a.** A Comprehensive Assessment of Maximum Power Point Tracking Techniques under Uniform and Non-uniform Irradiance and its Impact on photovoltaic Systems: a Review. J. Renewable and Sustainable Energy. 2015'7(6):063113.

18. **Haber I., Farkas I.** Combining CFD Simulations with Blockoriented Heatflow-network Model for Prediction of Photovoltaic Energy-production. J. Physics: Conf. Series. 2011.268(1):012008.

19. **Vergura S.** A Complete and Simplified Datasheet-Based Model of PV Cells in Variable Environmental Conditions for Circuit Simulation. Energies. 2016;9(5): 326—337.

20. **Alam M.K., Khan F., Johnson J., Flicker J.** A Comprehensive Review of Catastrophic Faults in PV Arrays: Types, Detection, and Mitigation Techniques. IEEE J. Photovoltaics. 2015;5;3:982—997.

Сведения об авторах:

Монаков Юрий Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: MonakovYV@mpei.ru

Шарапов Санжар Алимович — начальник отдела перспективного развития и технического сопровождения проектов ООО «Юнигрин Инжиниринг», e-mail: S.Sharapov@unigreen-energy.com

Середкин Даниил Юрьевич — аспирант кафедры электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: SeredkinDY@mpei.ru

Information about authors:

Monakov Yuriy V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electrical Stations Dept., NRU MPEI, e-mail: MonakovYV@mpei.ru

Sharapov Sanzhar A. — Head of Long-term Development and Technical Support of Projects Dept., LLC «Unigrin Engineering», e-mail: S.Sharapov@unigreen-energy.com

Seredkin Daniil Yu. — Ph.D.-student of Electrical Stations Dept., NRU MPEI, e-mail: SeredkinDY@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 07.06.2021

The article received to the editor: 07.06.2021