

УДК 303.732.4

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-108-117

**Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы****В. В. Гурьев**, аспирант, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия**В. В. Кувшинов**, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия**Б. А. Якимович**, доктор технических наук, профессор, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия**А. Г. Аль Баирмани**, аспирант, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия**Е. Г. Какушина**, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*Приведены результаты исследований установившихся режимов работы солнечных фотоэлектрических станций. При использовании полученных данных возможно значительно поднять эффективность использования солнечных электрогенерирующих установок и значительно увеличить срок службы дополнительного оборудования.*

*Актуальность данного исследования обусловлена увеличивающимся спросом на электроэнергетические системы малой мощности, а также на технологии возобновляемой энергетики. Для проведения исследований были взяты материалы профильных международных ведомств и агентств, Министерства энергетики Российской Федерации. Кроме того, источниками данных являются публикации и исследования российских и зарубежных ученых по исследуемой проблематике.*

*Принятый в декабре 2019 г. Государственной думой РФ Федеральный закон № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» вводит понятие «объект микрогенерации», тем самым упрощая возможность установки, подключения к общей сети электрической системы, например, небольшой солнечной электростанции потребителя.*

*Малая электроэнергетика на данном жизненном этапе – энергетически эффективный инструмент в реформировании энергетики Российской Федерации, способствующий отказу от традиционной централизованной системы, основанной на применении крупных источников электроэнергетического производства, и переходу на альтернативные способы получения электроэнергии, основанных на использовании источников энергии, актуализированных под конкретные природные условия и запросы потенциальных потребителей.*

*Уменьшение загрязняющих и являющихся вредными для здоровья человека выбросов позволяет снизить уровень сложившейся нагрузки на экономику страны и дать толчок для развития ее потенциала за счет высвободившихся ресурсов, уменьшить нагрузку на экономику, тем самым определяя ресурсы для ее роста.*

*Безусловно, переход от традиционных экономических моделей к модели зеленого роста может быть реализован только в случае приложения существенных усилий, направленных на расширение международного сотрудничества в этой области. Одновременно с этим возникает необходимость в последовательном проведении мероприятий различного уровня со стороны всех государств, а также поддержание выбранного политического курса на протяжении многих лет.*

**Ключевые слова:** солнечная электростанция (СЭС), установившийся режим СЭС, генерация энергии, статистическая устойчивость, малая генерация, ветротурбины.

**Введение**

**О**бъектом микрогенерации (малой генерации) являются устройства по производству электрической энергии, принадлежащие на праве собственности или ином законном основании потребителю (частному лицу или организации). Такими устройствами могут выступать генерирующие мощности на основе возобновляемых источников

энергии (ВИЭ) (солнечные батареи, ветрогенераторы, приливные/волновые электростанции и др.), например, солнечные электростанции (СЭС) на основе фотоэлектрических модулей (рис. 1) [1].

Технологическое присоединение объектов микрогенерации должно предусматривать их подключение к сетям гарантирующего поставщика на напряжении до 1000 В и обеспечение

технического ограничения выдачи электрической энергии в сеть с максимальной мощностью, не превышающей величину максимальной мощности принимающих устройств потребите-

ля электрической энергии, которому принадлежат на праве собственности или ином законном основании объекты микрогенерации, и составляющей не более 15 кВт [2].

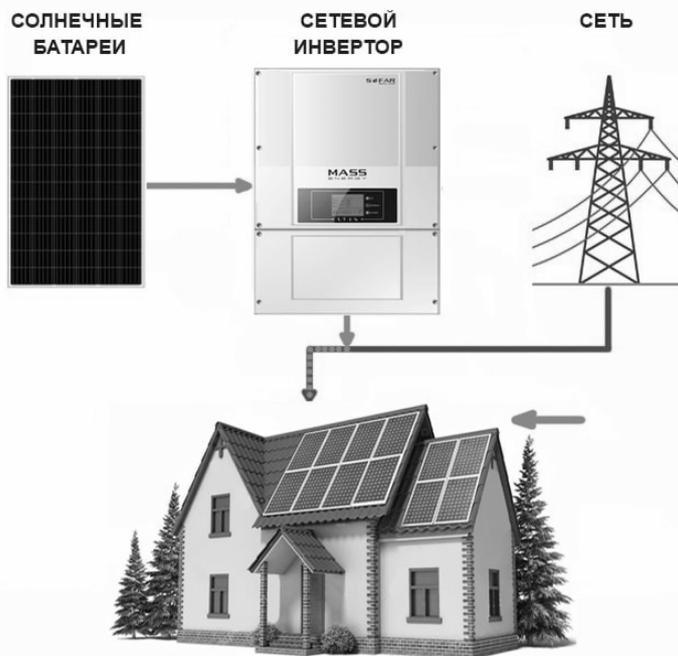


Рис. 1. СЭС с сетевым инвертором как объект микрогенерации

Fig. 1. SPP with a gridin verter as a microgeneration object

Требование по подключению СЭС к сети состоит в перетекании по ЛЭП тока от нее в сеть, синхронизированного по частоте и фазе, при этом напряжение сетевого инвертора СЭС должно быть чуть выше напряжения в сети [3].

Если же задачей ввода СЭС является продажа в сеть электроэнергии по «зеленому» тарифу и заработок, то сетевой инвертор необходимо подбирать по следующим параметрам:

- мощность инвертора не больше разрешенной мощности (можно повысить до 30 кВт);
- потребляемая нагрузкой собственника СЭС электроэнергия должна быть не больше генерируемой солнечными батареями и выдаваемой сетевым инвертором;
- сетевой инвертор должен быть сертифицированным;
- сетевой инвертор должен быть смонтирован организацией, имеющей лицензию на строительство объектов 4-й и 5-й категории сложности.

На международной конференции Energy Transition Dialogue, посвященной глобальному переходу на ВИЭ, которая прошла в Берлине в апреле 2020 года, Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA)

выступило с докладом «Преобразование глобальной энергетической системы. Дорожная карта до 2050 года». По их словам, через 30 лет долю зеленого электричества, производимого в основном солнцем и ветром, можно будет увеличить до 86 % [4].

Помимо ВИЭ наиболее распространенными в мировой практике технологиями распределенной генерации энергии являются технологии на природном газе более маневренные ГТУ и ПГУ и др.

К распределенной генерации в основном относятся источники небольшой мощности, такие как ветряные электростанции мощностью до 500 кВт, солнечные электростанции до 1 МВт, газотурбинные электростанции до 250 кВт [5].

Пограничные пределы мощностей источников распределенной генерации, по определению Европейского проекта партнерства в распределенной энергетике (The European Union Dynamical Exascale Entry Platform, EU-DEEP), следующие: ветряные станции – 6 МВт; солнечные станции – 5 МВт; тепловые электростанции (паровые, газовые турбины, поршневые двигатели) – до 10 МВт, микротурбины – до 500 кВт [6].

Переход энергетической системы на новый уровень приводит к устойчивому территориальному развитию, энергетической безопасности, а также позволяет решить глобальные экологические проблемы, на что нацелены многие государства, и реализовывают различные программы развития малой генерации

Среди мер, применяемых государствами для поддержки развития распределенной генерации, стоит отметить налоговые льготы, образование различных фондов, за счет которых осуществляется финансирование соответствующих научно-исследовательских работ и проектной деятельности, утверждение объемов электрической энергии, которая должна вырабатываться на ВИЭ, и др. [7].

Распределенная генерация вносит большие изменения в сетевую конфигурацию и режимы, в результате требования к традиционной защите и управляющей системе приходится корректировать и перестраивать. По состоянию на сегодняшний день стандарты на подключение распределенной генерации к системе электроснабжения по большей части основаны на принципе, что распределенная генерация не должна влиять на нормальное исполнение действий защиты и управление системой. Но такой вариант не может быть использован, когда доля распределенной генерации более 15 % от общей установленной мощности, что оказывает существенное влияние на режимы работы энергосистемы при различных колебаниях [8].

Распределенная генерация является практически рациональным вариантом обеспечения надежности электроснабжения в зонах централизованной энергетики. Главным средством повышения надежности является структурное резервирование [9]. Резервная электростанция или резервный электроагрегат в локальной зоне, требующей повышенной надежности, легко решают эту задачу.

Электрическая энергия, произведенная на объектах микрогенерации и не потребленная их собственниками и иными законными владельцами в целях удовлетворения собственных бытовых и (или) производственных нужд, реализуется на розничных рынках в порядке, установленном основными положениями функционирования розничных рынков [10].

Реализация физическими лицами электрической энергии, произведенной на объектах микрогенерации, не является предпринимательской деятельностью.

Заключение договора купли-продажи электрической энергии, произведенной на объектах

микрогенерации, расположенных в зоне деятельности гарантирующего поставщика, с обратившимися к гарантирующему поставщику собственником или иным законным владельцем объектов микрогенерации является обязательным для гарантирующего поставщика [11].

Учет потребленной и отданной электроэнергии между СЭС и сетевой организацией можно контролировать, например, многофункциональным двунаправленным счетчиком ПСЧ-4ТМ.05МД.21 [12].

Гарантирующий поставщик, функционирующий в ценовых и неценовых зонах оптового рынка, приобретает на розничных рынках у собственников и иных законных владельцев объектов микрогенерации электрическую энергию, произведенную на объектах микрогенерации, по ценам, не превышающим цены на приобретаемые на оптовом рынке гарантирующими поставщиками электрическую энергию и мощность [13].

Если разделить стоимость, например, сетевой солнечной электростанции мощностью 20 кВт на ее суточную выработку, умноженную на примерную цену электроэнергии на оптовом рынке, то срок окупаемости СЭС составит около 15 лет. Такой срок сопоставим со сроком службы солнечных панелей и почти вдвое больше срока службы сетевого инвертора [14]. Поэтому СЭС как объект микрогенерации не выгодно покупать для получения прибыли от продажи электроэнергии при отсутствии зеленого тарифа. Также не получится использовать сеть как огромный внешний аккумулятор, куда можно складировать избыток выработанной электроэнергии, поскольку у потребителя стоит двунаправленный счетчик, считающий отдельно объем отданной в сеть электроэнергии и объем полученной электроэнергии из сети [15].

При расчетах в конце месяца составляется баланс, и если СЭС сгенерировала электроэнергии больше, чем потребил ее владелец, ему выплачивают разницу, рассчитанную по оптовым ценам рынка. Если же он сгенерировал на СЭС электроэнергии меньше, чем потребил, то он оплачивает разницу уже по розничной цене [16].

**Цель исследования** – разработка метода анализа статической устойчивости установившихся режимов работы сетевой СЭС на основе якобиана уравнений установившегося режима и построения допустимых областей в пространстве напряжений и мощностей, которая может быть применена к СЭС произвольной мощности.

Для решения предложенных целей были поставлены следующие задачи исследований:

- проведение теоретических исследований для определения режимов генерации электрической энергии СЭС при параллельной работе с сетью;
- решение математических уравнений, используемых в моделировании работы СЭС, работающей совместно с общей энергосистемой;
- определение областей допустимых значений для установившихся режимов работы солнечной электростанции.

**Установившийся режим работы СЭС совместно с сетью электрической системы**

Рассмотрим установившийся режим работы СЭС совместно с сетью электрической системы (рис. 2). Установившийся режим должен удовлетворять не только техническим ограничениям на уровень напряжения СЭС ( $1,1U_n \geq U_1 \geq 0,9U_n$ ) и длительно допустимый ток в ЛЭП, связывающий СЭС с сетью, но и *быть* статически устойчивым [17].

Уравнения установившегося режима для системы, изображенной на рис. 3, представляют собой уравнения баланса мощности в узле 1 СЭС, т. е. полная мощность генерации СЭС (обычно принимается отрицательной) должна полностью передаваться по ЛЭП в сеть или потребляться нагрузкой узла:

$$-\dot{S}_1 = \sqrt{3} \dot{U}_1^* I, \quad (1)$$

где  $-\dot{S}_1$  – полная мощность генерации СЭС;  $\dot{U}_1$  – комплексное напряжение сетевого инвертора СЭС;  $I^*$  – сопряженный комплекс тока, протекающий от СЭС в сеть или из сети в узел по ЛЭП.

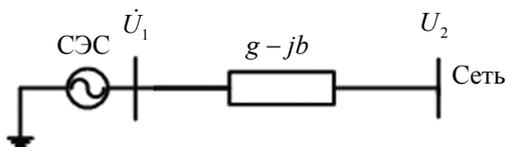


Рис. 2. Схема выдачи мощности СЭС в общую распределительную сеть электрической системы

Fig. 2. Scheme of power output of SPP to the general distribution network of the electrical system

Для дальнейшего анализа удобно представить в уравнении (1) комплекс полной мощности в алгебраической форме, а комплекс напряжения – в тригонометрической форме:

$$-(P_1 + jQ_1) = \sqrt{3}(U_1 \cos \delta_1 + jU_1 \sin \delta_1). \quad (2)$$

Напряжение сети  $U_2$  принимаем за базисное и вещественное ( $\delta_2 = 0$ ), а комплекс тока в ЛЭП определим по закону Ома:

$$\dot{I} = (-U_2)(g - jb). \quad (3)$$

Активную  $g$  и реактивную  $b$  проводимости ЛЭП можно определить по соответствующим активной  $r_0$  и реактивной  $x_0$  погонным сопротивлениям провода, связывающего СЭС с сетью, и его длине  $L$ :

$$\left\{ \begin{aligned} g &= \frac{r_0}{L(r_0^2 + x_0^2)} \\ b &= \frac{x_0}{L(r_0^2 + x_0^2)} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Из (1) можно определить комплекс тока в ЛЭП, если разделить сопряженный комплекс полной мощности на сопряженный комплекс напряжения  $U_1^*$

$$\dot{I} = \frac{-\dot{S}_1^*}{\sqrt{3}U_1^*}. \quad (5)$$

Подставляя полученное выражение для тока в уравнение (3) и заменяя фазные напряжения на линейные, получим комплексное уравнение, описывающее установившийся режим в электрической сети, представленной на рисунке 3:

$$-\dot{S}_1^* = U_1^* (\dot{U}_1 - U_2) (g - jb). \quad (6)$$

Выполнив умножение в правой части уравнения (6) получим следующее алгебраическое выражение:

$$-(P_1 - jQ_1) = U_1^2 g - jU_1^2 b - U_1 U_2 g \cos \delta_1 + jU_1 U_2 b \cos \delta_1 + jU_1 U_2 g \sin \delta_1 + U_1 U_2 b \sin \delta_1. \quad (7)$$

Комплексное уравнение (7) может быть сведено к двум вещественным уравнениям, определяющим баланс в сети активной и реактивной мощности, и представлено следующими уравнениями:

$$P_1 + U_1^2 g - U_1 U_2 g \cos \delta_1 + U_1 U_2 b \sin \delta_1 = W_a; \quad (8)$$

$$-Q_1 - U_1^2 b + U_1 U_2 b \cos \delta_1 + U_1 U_2 g \sin \delta_1 = W_r. \quad (9)$$

В уравнениях (8) и (9)  $W_a$  и  $W_r$  небалансы, соответственно, активная и реактивная мощно-

сти в узле СЭС, представляющие собой неявные функции переменных  $U_1$ ,  $\delta_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$  и  $U_2$ , в установившемся режиме должны быть равны нулю.

В свою очередь, переменные  $U_1$ ,  $\delta_1$  будут зависимыми от  $P_1$ ,  $Q_1$  и  $U_2$ . Основываясь на работах, проведенных в этом направлении, в том числе и другими авторами, делаем закономерный вывод, что судить о статической устойчивости режима электрической системы можно по якобиану уравнений установившегося режима, который совпадает со свободным членом характеристического уравнения малых колебаний.

### Якобиан уравнений установившегося режима

Рассмотрим якобиан уравнений установившегося режима (8), (9), который может характеризовать устойчивость работы СЭС в составе электрической системы:

$$\det = \begin{vmatrix} \frac{\partial W_a}{\partial \delta_1} & \frac{\partial W_a}{\partial U_1} \\ \frac{\partial W_r}{\partial \delta_1} & \frac{\partial W_r}{\partial U_1} \end{vmatrix} = \frac{\partial W_a}{\partial \delta_1} \frac{\partial W_r}{\partial U_1} - \frac{\partial W_r}{\partial \delta_1} \frac{\partial W_a}{\partial U_1}. \quad (10)$$

Здесь  $\frac{\partial W_a}{\partial \delta_1}$ ,  $\frac{\partial W_r}{\partial \delta_1}$ ,  $\frac{\partial W_a}{\partial U_1}$ ,  $\frac{\partial W_r}{\partial U_1}$  – соответственно,

частные производные небалансов активной и реактивной мощности в узле СЭС по углу и модулю напряжения.

При выполнении вычислений производных, а также при выполнении арифметических действий по формуле (10) получим следующее достаточно простое выражения для якобиана:

$$\det = U_1 U_2 (g^2 + b^2) (U_2 - 2U_1 \cos \delta_1). \quad (11)$$

Уравнение (11) предоставляет возможность определения границы предельных по статической устойчивости установившихся режимов работы СЭС, на которой  $\det$  становится равным нулю.

Учитывая тот факт, что в реально существующих режимах ни один из вышеперечисленных параметров –  $U_1$ ,  $U_2$  и  $(g^2 + b^2)$  – не может быть равным нулю, уравнение (11) можно записать в виде

$$U_1 = \frac{U_2}{2 \cos \delta_1}. \quad (12)$$

Используя уравнение (12), определяющее предельное состояние уравнений установившегося режима, рассмотрим работу СЭС, подключенной к сети 0,4 кВ электрической системы

воздушной линией электропередачи проводом СИП 2а 4×16 мм<sup>2</sup>.

Напряжение, установившееся в точке присоединения СЭС к сети  $U_2$ , будем считать равным  $U_n = 0,4$  кВ.

Погонные параметры провода ЛЭП из (8):  $r_0 = 1,91$  Ом/км;  $x_0 = 0,0865$  Ом/км. Длину линии электропередач примем равной 50 м.

Рассчитанные по указанному уравнению (4) активная и реактивная составляющие проводимости ЛЭП, соответственно:

$$g = 10,45 \text{ См};$$

$$b = 0,47 \text{ См}.$$

На рисунке 3 для указанных параметров сети и ЛЭП показана кривая, построенная по полученным данным из расчета по формуле (12), на которой якобиан уравнений (8), (9) обращается в ноль.

Область  $D_x$ , которая показана на этом же рисунке, соответствует статически аperiodически устойчивым режимам работы СЭС, в данной области  $\det > 0$ .

Вне этой области установившийся режим работы СЭС будет неустойчивым, и его реализация невозможна. Согласно полученным данным при  $\delta_1 > 0$  СЭС генерирует мощность в сеть, а при  $\delta_1 < 0$  СЭС переходит в режим потребления мощности из сети.

Если кривую  $\det = 0$  в пространстве  $U_1 - \delta_1$  с помощью уравнений (8), (9) отобразить в пространство активных и реактивных мощностей СЭС, то получим область существования установившихся режимов  $D_y$ . Изображение этой области представлено на рисунке 4.

Для любых мощностей, которые принадлежат  $D_y$ , существует установившийся режим, который можно представить в координатах  $U_1 - \delta_1$ .

Следует обратить внимание, что для  $P_1$  и  $Q_1$  вне  $D_y$  установившихся режимов СЭС не существует. Внутри области устойчивых режимов  $D_x$  (рис. 3) выделена область установившихся режимов СЭС, допустимых по уровню напряжения  $U_1 - D_{хд}$ , в которой установившиеся режимы СЭС будут устойчивыми и допустимыми.

Для того, чтобы  $U_1$  и  $\delta_1$  в установившемся режиме находились в допустимой области  $D_{хд}$ , эту область необходимо отобразить в пространство  $P_1 - Q_1$ .

На рисунке 5 показана полученная область  $D_{уд}$  допустимых значений  $P_1$  и  $Q_1$ , при задании которых на СЭС будут выполняться технические ограничения по уровню напряжения  $U_1$ .

Как видно из рисунка 5, в области микрогенерации активной мощности или ее потребления из сети ( $-0,1 \text{ МВт} < P_1 < 0,1 \text{ МВт}$ ) устано-

вившиеся режимы СЭС полностью находятся в допустимой области  $D_{уд}$ .

Однако для каждого значения  $P_1$  и  $Q_1$  даже из  $D_{уд}$  в пространстве  $U_1 - \delta_1$  существуют 2 установившихся режима, один из которых, принадлежащий  $D_{хд}$ , будет статически устойчивым, а вне области  $D_x$  будет статически неустойчивым.

Поэтому задание  $P_1$  и  $Q_1$  из  $D_{уд}$  является необходимым, но недостаточным условием для

того, чтобы установившийся режим СЭС обладал статической устойчивостью.

Для обеспечения статической устойчивости установившегося режима СЭС необходимо контролировать как модуль напряжения станции, так и угол этого напряжения относительно напряжения  $U_2$ . В области допустимых значений  $U_1$  этот угол не должен превышать  $\pm 63^\circ$  для  $U_1 = 1,1U_n$  и  $\pm 56,3^\circ$  для  $U_1 = 0,9U_n$ .

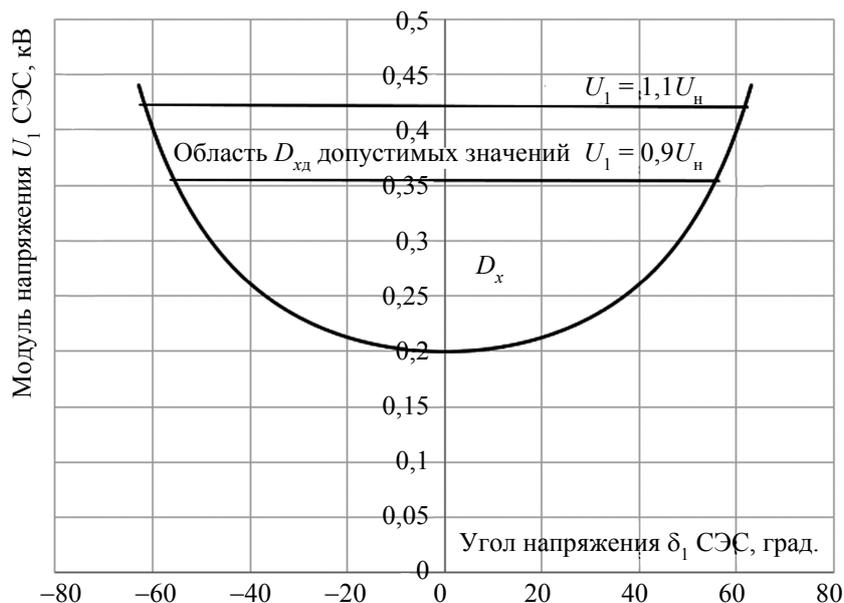


Рис. 3. Граница якобиана (det), равного нулю, уравнений установившихся режимов СЭС в координатах  $U_1$  и  $\delta_1$

Fig. 3. Boundary of the Jacobian (det) equal to zero of the equations of steady state SPP regimes in coordinates  $U_1$  and  $\delta_1$

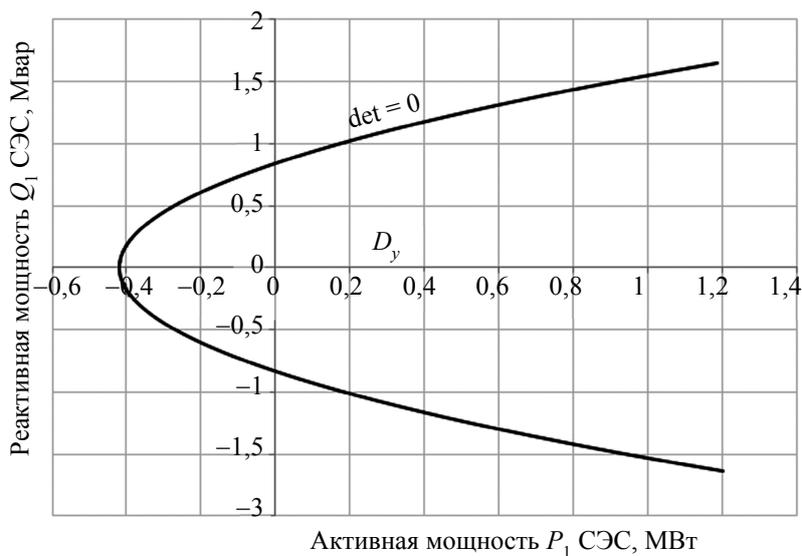


Рис. 4. Область существования установившихся режимов СЭС  $D_y$  в координатах генерации ее активной  $P_1$  и реактивной  $Q_1$  мощности

Fig. 4. The region of existence of steady-state SPP regimes  $D_y$  in coordinates of generation of its active  $P_1$  and reactive  $Q_1$  power

При работе СЭС в составе электрической системы нарушение статической устойчивости ее установившихся режимов могут возникнуть, например, при внезапном повышении напряже-

ния сети  $U_2$ , вызванным коммутационными переключениями или атмосферными явлениями, поскольку сети 0,4 кВ часто устанавливаются на одних опорах с сетями 10 кВ [18].

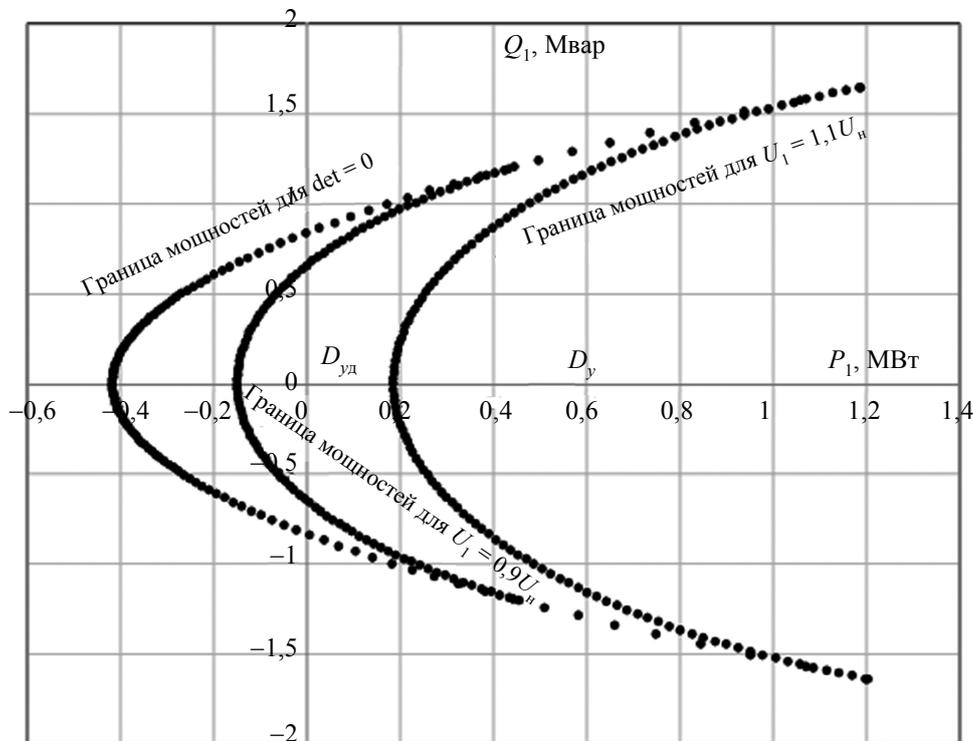


Рис. 5. Область допустимых значений  $P_1$  и  $Q_1$  СЭС ( $D_{уд}$ ) внутри области существования установившихся режимов  $D_y$ , при которых напряжение  $U_1$  находится в диапазоне  $(0,9 \dots 1,1) U_n$

Fig. 5. The area of admissible values of  $P_1$  and  $Q_1$  SPP ( $D_{уд}$ ) inside the area of existence of steady-state modes  $D_y$ , at which the voltage  $U_1$  is in the range  $(0.9 \dots 1.1) U_n$

Также к выходу параметров установившегося режима из области статической устойчивости может привести кратковременное снижение  $U_1$ , вызванное, например, пуском мощного двигателя в узле СЭС, или сбой в работе сетевого инвертора СЭС, приведший к выходу  $\delta_1$  за указанные выше пределы [19].

Применяя полученные данные, можно значительно поднять эффективность выработки электрической энергии солнечной станцией. Использование наиболее рациональных режимов работы СЭС возможно значительно увеличить срок службу вспомогательного оборудования и надежность эксплуатации [20].

### Выводы

1. Предложенная методика анализа статической устойчивости установившихся режимов работы сетевой СЭС на основе якобиана уравнений установившегося режима и построения допустимых областей в пространстве напряжений и мощностей может быть применена к СЭС произвольной мощности.

2. В процессе настройки устройств контроля электрических параметров СЭС следует учитывать ограничения не только на модули, но и на углы напряжения станции.

3. Перенапряжение в сети, снижение модуля напряжения в узле СЭС, вызванные, например, пуском мощного электродвигателя, а также сбой в работе сетевого инвертора станции могут привести к переходу установившегося режима в статически неустойчивую область.

4. Результаты исследования показали выполнимость и точность предложенного метода в неполном тематическом исследовании. Выполненные расчеты доказывают неоспоримость факта существенного вклада данной статьи в исследования тематики микрогенерации.

### Библиографические ссылки

1. Белокрылова Е. А., Кологерманская Е. М. Современные политико-правовые аспекты развития возобновляемых источников энергии в российской

федерации // Вестник удмуртского университета. 2017. Т. 27, № 2 С. 85–93.

2. Широков А. В., Шимон Н. С. Проблемы энергоснабжения в Республике Крым // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2017. Т. 1 (8). С. 47–49.

3. Алехин В. Н., Шароварова Е. П. Потенциал развития ВИЭ на территориях России с децентрализованным энергоснабжением // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2020. № 5 (221). С. 54–55.

4. Богачкова Л. Ю., Усачева Н. Ю., Усачева И. В. Развитие ВИЭ-генерации на территории бывшего СССР: сравнительный анализ опыта Казахстана, России и Украины // Экономика и управление: теория и практика. 2020. № 2. С. 5–19.

5. Abdali L.M., Issa H.A. [Hybrid power generation usingsolarandwindenergy] // Молодой ученый. 2018. № 7. С. 19–26.

6. Рыбкина Я. А. Правовая природа отбора проектов ВИЭ и применение норм антимонопольного законодательства к процедуре отбора проектов ВИЭ // Правовой энергетический форум. 2018. № 4. С. 38–45.

7. Layth Mohammed Abdali, Haider Ahmed Mohammed and Husam Abdulhusein Wahhab [A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter]. J. of Engineering and Applied Sciences, 2019, no. 14, pp. 3666-3673. doi.org/10.36478/jeasci.2019.3666.3673.

8. Жданев О. В., Зуев С. С. Развитие ВИЭ и формирование новой энергополитики России // Энергетическая политика. 2020. № 2 (144). С. 84–95.

9. Чивенков А. И., Крахмалин И. Г. Универсальный преобразователь как основа для согласования параметров источников распределенной сети с ВИЭ // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. С. 112–125.

10. Орлов А. Окупаемость проектов ВИЭ: не так сложно, как кажется // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 11. С. 70–72.

11. Перминов Э. М. К вопросу о структуре энергетики будущего // Энергия единой сети. 2019. № 5 (48). С. 10–28.

12. Шарифов Б. Н. Электромагнитные переходные процессы в системе управления выходными параметрами солнечной электростанции // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. № 4 (48). С. 26–32.

13. Выбор способа управления маломощной солнечной электростанцией / Д. В. Куделина, В. И. Бирюлин, В. Э. Деденко, М. А. Иванова // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2019 : сборник научных статей 8-й Международной молодежной научной конференции. В 6 т. 2019. С. 82–86.

14. Илюшин П. В., Куликов А. Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Нижний Новгород, 2019.

15. Мозохин А. Е., Шведенко В. Н. Анализ направлений развития цифровизации отечественных и зарубежных энергетических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 4. С. 657–672.

16. Демченко К. В. Основные принципы организации оптового рынка электроэнергии и мощности Российской Федерации // Главный энергетик. 2019. № 12. С. 23–27.

17. Филиппов С. П., Дильман М. Д., Илюшин П. В. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 4–17.

18. Маликова О. И., Златникова М. А. Государственная политика в области развития возобновляемой энергетики // Государственное управление. Электронный вестник. 2019. № 72. С. 5–30.

19. Воротицкий В. Э., Жабин К. В., Колибаба В. И. Сравнительный анализ управления реактивной мощностью на электроэнергетических рынках зарубежных стран и России // Электрические станции. 2020. № 5 (1066). С. 8–19.

20. Илюшин П. В., Тьквинский А. М. Особенности обеспечения надежного электроснабжения промышленных потребителей в изолированных энергосистемах // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 1 (41). С. 39–50.

## References

1. Belokrylova E.A., Kologermanskaya E.M. [Modern political and legal aspects of the development of renewable energy sources in the Russian Federation]. *Vestnik udmurtskogo universiteta*, 2017, vol. 27, no. 2, pp. 85-93 (in Russ.).

2. Shirokov A.V., Shimon N.S. [Problems of energy supply in the Republic of Crimea]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*, 2017, vol. 1, pp. 47-49 (in Russ.).

3. Alekhin V.N., Sharovarova E.P. [The potential for the development of renewable energy sources in Russian territories with decentralized energy supply]. *Santekhnika. Otoplenie. Konditsionirovanie*, 2020, no. 5, pp. 54-55 (in Russ.).

4. Bogachkova L.Yu., Usacheva N.Yu., Usacheva I.V. [Development of renewable energy generation in the territory of the former USSR: a comparative analysis of the experience of Kazakhstan, Russia and Ukraine]. *Ekonomika i upravlenie: teoriya i praktika*, 2020, no. 2, pp. 5-19 (in Russ.).

5. Abdali L.M., Issa H.A. [Hybrid power generation usingsolarandwindenergy]. *Molodoi uchenyi*, 2018, no. 7, pp. 19-26 (in Russ.).

6. Rybkina Ya.A. [Legal nature of the selection of renewable energy projects and the application of antimonopoly legislation to the procedure for selecting renewable energy projects]. *Pravovoi energeticheskii forum*, 2018, no. 4, pp. 38-45 (in Russ.).

7. Layth Mohammed Abdali, Haider Ahmed Mohammed and Husam Abdulhusein Wahhab [A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter]. J. of Engineering and Applied Sciences, 2019, no. 14, pp. 3666-3673. doi.org/10.36478/jeasci.2019.3666.3673.

8. Zhdaneev O.V., Zuev S.S. [Development of renewable energy sources and the formation of a new energy policy in Russia]. *Energeticheskaya politika*, 2020, no. 2, pp. 84-95 (in Russ.).

9. Chivenkov A.I., Krakhmalin I.G. [Universal converter as a basis for matching the parameters of sources of a distributed network with RES]. *Intellektual'naya elektrotehnika*, 2018, no. 1, pp. 112-125 (in Russ.).

10. Orlov A. [Payback of renewable energy projects: not as difficult as it seems]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2018, no. 11, pp. 70-72 (in Russ.).

11. Perminov E.M. [On the question of the energy structure of the future]. *Energiya edinoi seti*, 2019, no. 5, pp. 10-28 (in Russ.).

12. Sharifov B.N. [Electromagnetic transients in the control system for the output parameters of a solar power plant]. *Politekhicheskii vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*, 2019, no. 4, pp. 26-32 (in Russ.).

13. Kudelina D.V., Biryulin V.I., Dedenko V.E., Ivanova M.A. *Pokolenie budushchego: Vzgl'yad molodykh uchennykh – 2019* [Generation of the Future: Young Scientists Perspective 2019]. *Sbornik nauchnykh statei 8-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Collection of scientific articles of the 8th International Youth Scientific Conference], 2019, pp. 82-86 (in Russ.).

14. Ilyushin P.V., Kulikov A.L. *Avtomatika upravleniya normal'nymi i avariinymi rezhimami energoionov s raspredelennoi generatsiei* [Automatic control of normal and emergency modes of power districts with distributed generation]. Nizhny Novgorod, 2019.

15. Mozokhin A.E., Shvedenko V.N. [Analysis of directions for the development of digitalization of domestic and foreign energy systems]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 657-672 (in Russ.).

16. Demchenko K.V. [Basic principles of organizing the wholesale electricity and power market of the Russian Federation]. *Glavnyi energetik*, 2019, no. 12, pp. 23-27 (in Russ.).

17. Filippov S.P., Dilman M.D., Ilyushin P.V. [Distributed generation and sustainable development of regions]. *Teploenergetika*, 2019, no. 12, pp. 4-17 (in Russ.).

18. Malikova O.I., Zlatnikova M.A. [State policy in the field of renewable energy development]. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyi vestnik*, 2019, no. 72, pp. 5-30 (in Russ.).

19. Vorotnitsky V.E., Zhabin K.V., Kolibaba V.I. [Comparative analysis of reactive power control in the electric power markets of foreign countries and Russia]. *Elektricheskie stantsii*, 2020, no. 5, pp. 8-19 (in Russ.).

20. Ilyushin P.V., Tykvinskii A.M. [Features of ensuring reliable power supply to industrial consumers in isolated energy systems]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 39-50 (in Russ.).

### Investigation of Existence of Steady States of a Solar Power Plant Operating in the Distribution Network of an Electric Power System

V.V. Guryev, Post-graduate, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

V.V. Kuvshinov, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

B.A. Yakimovich, DSc in Engineering, Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

A.G. Al Bairmani, Post-graduate, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

E.G. Kakushina, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*The paper presents the results of studies of the steady-state operating modes of solar photovoltaic stations. Using the data obtained, it is possible to significantly increase the efficiency of using solar power generating plants and significantly increase the service life of additional equipment.*

*The relevance of this study is due to the increasing demand for low-power electric power systems, as well as for renewable energy technologies. For the research, materials were taken from relevant international departments and agencies, the Ministry of Energy of the Russian Federation. In addition, the sources of data are publications and studies of Russian and foreign scientists on the issues under study.*

*The Federal Law No. 35-FZ "On Electricity", adopted in December 2019 by the State Duma of the Russian Federation, introduces such a concept as "Micro-generation facility", thereby simplifying the possibility of installing, connecting to the general network of an electrical system, for example, a small solar power plant (SPP) consumer.*

*Small-scale electric power industry at this stage of its life is an energy-efficient tool in the restructuring of the energy sector of the Russian Federation, contributing to the abandonment of the traditional centralized system based on the use of large sources of electric power production, and the transition to alternative methods of generating electricity based on the use of energy sources, updated for specific natural conditions and requests of potential consumers.*

*Reducing pollutants and emissions that are harmful to human health can reduce the level of the existing burden on the country's economy and give an impetus to the development of its potential due to the freed up resources. reduce the burden on the economy, thereby freeing up resources for its growth.*

*Of course, the transition from traditional economic models to the model of "green growth" can be realized only if significant efforts are made to expand international cooperation in this area. At the same time, there is a need for consistent implementation of events at various levels on the part of all states, as well as maintaining the chosen political course for many years.*

**Keywords:** solar power plant (SES), steady state SES, energy generation, statistical stability, small generation, wind turbines.

Получено 29.11.2021

**Образец цитирования**

Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы / В. В. Гурьев, В. В. Кувшинов, Б. А. Якимович, А. Г. Аль Баирмани, Е. Г. Какушина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 1. С. 108–117. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-108-117.

**For Citation**

Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A., Al Bairmani A.G., Kakushina E.G. [Investigation of Existence of Steady States of a Solar Power Plant Operating in the Distribution Network of an Electric Power System]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 108-117 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-108-117.