УДК 620.97

Математическое моделирование производства электроэнергии солнечной энергоустановкой для условий Республики Марий Эл

Осташенков А.П., Медяков А.А., Каменских А.Д., Воробьев К.М.

Поволжский государственный технологический университет

Аннотация

Проведено математическое моделирование производства электроэнергии солнечной энергетической установкой с сетевым инвертором, предназначенной для электроснабжения сельского жилого дома, для условий центральной части Республики Марий Эл. Были рассмотрены три варианта солнечной энергетической установки: система с фотоэлектрическими модулями, имеющими фиксированный наклон, система с устройством слежения за Солнцем, система с фотоэлектрическими модулями с концентрацией солнечной энергии. Наибольший объем реализованной электроэнергии обеспечивает система с концентраторами солнечной энергии. По сравнению с вариантом системы с фотоэлектрическими модулями, имеющими фиксированный наклон, применение концентраторов обеспечивает более чем трёхкратное увеличение (при коэффициенте концентрации солнечного излучения 2) годового объема реализованной электроэнергии. Для варианта системы с устройством слежения за Солнцем (без концентраторов) аналогичный показатель составляет 18,4%. Стоимость реализованной за год электроэнергии (при цене 3,2 руб./кВт·ч) для трех вариантов системы составит: система с фотоэлектрическими модулями, имеющими фиксированный наклон, – 9,14 тыс. руб., система с устройством слежения за Солнцем – 10,82 тыс. руб., система с концентраторами солнечной энергии – 30,25 тыс. руб.

Ключевые слова: СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОБЪЕМ РЕАЛИЗОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Введение

Обеспечение электроснабжения сельских объектов возможно за счет использования микроэлектростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В связи с

принятием в Российской Федерации закона от 27.12.2019 №471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации» [1] электрическая энергия, произведенная микроэлектростанциями и не потребленная их собственниками, может быть реализована. Это обуславливает повышение интереса к использованию установок на основе ВИЭ сельскохозяйственными потребителями, для которых соблюдаются условия: мощность микроэлектростанции не превышает величину максимальной присоединенной мощности энергопринимающих устройств потребителя и составляет не более 15 кВт, энергопринимающие устройства потребителя технологически присоединены к объектам электросетевого хозяйства с уровнем напряжения до 1000 В [1]. При этом оценка объема выдачи электрической энергии микроэлектростанцией на основе ВИЭ в электрическую сеть может быть проведена методом математического моделирования.

Исследованиям установок на основе ВИЭ методом моделирования посвящено большое количество работ. Моделированию ветроэнергетических установок посвящены работы [2-5], солнечных энергетических установок [6-8]. Однако в контексте оценки объема выдачи электрической энергии микроэлектростанцией на основе ВИЭ в электрическую сеть следует учитывать как условия, приведенные в [1], относительно максимальной мощности и осуществления технологического присоединения микроэлектростанции, так и потенциал ВИЭ конкретного региона.

В этой связи представляется актуальной задача математического моделирования производства электроэнергии солнечной энергетической установкой для условий Республики Марий Эл.

Объектом исследования является солнечная энергетическая установка, предназначенная для электроснабжения сельского жилого дома.

Предметом исследования является производительность солнечной энергетической установки.

Цель работы – провести математическое моделирование производства электроэнергии солнечной энергетической установкой для условий Республики Марий Эл.

Задачи:

1. Разработать математическую модель производства электроэнергии солнечной

энергетической установкой с учетом возможности реализации непотреблённой электроэнергии.

2. Провести математическое моделирование производства электроэнергии солнечной энергетической установкой для условий Республики Марий Эл.

3. Провести расчет количества электроэнергии, которое может быть реализовано на примере сельского жилого дома.

Материалы и методы

В рамках данной работы в качестве объекта микрогенерации, принадлежащего сельскохозяйственному потребителю, принята солнечная энергетическая установка. При этом были рассмотрены несколько вариантов фотоэлектрической системы: система с фотоэлектрическими модулями, имеющими фиксированный наклон, система с устройством слежения за Солнцем, система с фотоэлектрическими модулями с концентрацией солнечной энергии.

Для электроснабжения сельского жилого дома рассматривается солнечная энергетическая установка с сетевым инвертором, имеющим подключение к сети и к фотоэлектрическим модулям. Выбор данного типа системы обусловлен отсутствием необходимости в использовании аккумуляторных батарей, что упрощает систему и снижает капитальные и эксплуатационные затраты.

Сетевой инвертор обеспечивает преобразование электрической энергии постоянного тока от фотоэлектрических модулей в энергию переменного тока. При этом в случае, если производство электрической энергии фотоэлектрическими модулями превышает потребление электроэнергии сельскохозяйственным потребителем, избыточная энергия передается в сеть.

Если потребление превышает производство электроэнергии фотоэлектрическими модулями, то необходимое количество электроэнергии потребляется из сети. С помощью счетчика ведется учет потоков мощности (счетчик фиксирует количество электроэнергии в прямом (прием из внешней сети) и обратном (отдача в сеть) направлениях).

Объем реализованной электроэнергии за расчетный период определяется разностью объемов выдачи электрической энергии в электрическую сеть и потребления из сети за расчетный период. Схема системы электроснабжения представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схема системы электроснабжения

Математическая модель производства электроэнергии солнечной энергетической установкой была реализована в программе MS Excel. Методика математического моделирования заключалась в следующем. На первом этапе с использованием данных об инсоляции в месте размещения солнечной энергетической установки [9] определялись значения инсоляции неподвижной наклонной поверхности, инсоляции следящей за Солнцем поверхности, инсоляции приемной поверхности с учетом коэффициента концентрации солнечного излучения по методикам, приведенным в [10]. Затем определялись значения количества электрической энергии (кВт·ч), генерируемой фотоэлектрическими модулями за расчетный период (месяц), для трех вариантов фотоэлектрической системы:

– система с фотоэлектрическими модулями, имеющими фиксированный наклон

$$W_{\text{ФМ.накл.}} = S_{\text{ФМ}} \eta_{\text{ФМ}} W_{\text{накл.}}$$

где: $S_{\text{ФМ}}$ – суммарная площадь приемных поверхностей фотоэлектрических модулей, м^2 ;

$\eta_{\text{ФМ}}$ – КПД фотоэлектрических модулей;

$W_{\text{накл.}}$ – значение энергии, поступающей на наклонную поверхность за расчетный период, $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$;

– система с устройством слежения за Солнцем

$$W_{\text{ФМ.слеж.}} = S_{\text{ФМ}} \eta_{\text{ФМ}} W_{\text{сл.}}$$

где $W_{\text{сл.}}$ – значение энергии, поступающей на следящую за Солнцем приемную поверхность за расчетный период, $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$;

– система с фотоэлектрическими модулями с концентрацией солнечной энергии

$$W_{\text{ФМ.конц.}} = S_{\text{ФМ}} \eta_{\text{ФМ}} W_{\text{сл.}} k_c,$$

где k_c – коэффициент концентрации солнечного излучения.

На следующем этапе определялся объем потребления электрической энергии электроприемниками с учетом набора устанавливаемых приборов и режима их работы:

$$W_{\text{нг}} = \sum_{i=1}^n P_{pi} \cdot t_i,$$

где P_{pi} – расчетная нагрузка i -го электроприемника, определяемая с использованием коэффициента спроса, кВт;

t_i – число часов работы i -го электроприемника в течение расчетного периода, ч.

Далее определялся объем электроэнергии, который может быть реализован в конце расчетного периода для каждого из трех вариантов фотоэлектрической системы, путем нахождения разности между соответствующим количеством сгенерированной электроэнергии и потреблением электроэнергии электроприемниками сельского жилого дома за расчетный период. При этом стоимость реализованной электрической энергии определялась путем умножения объема реализованной электроэнергии (кВт·ч) на стоимость 1 кВт·ч (руб./кВт·ч).

Допущения, принятые при математическом моделировании:

- не учитывались потери электрической энергии в элементах системы;
- не учитывались затенение и загрязнение фотоэлектрических модулей, а также влияние их температуры на производительность фотоэлектрической системы;
- не учитывалась погрешность работы устройства слежения за Солнцем;
- цена 1 кВт·ч реализованной электроэнергии неизменна (в действительности она может меняться в течение года по причине изменения цены на приобретаемую на оптовом рынке гарантирующим поставщиком электрическую энергию);
- в течение года месячный объем потребления электроэнергии неизменен.

Результаты исследований

Математическое моделирование производства электроэнергии солнечной энергетической установкой было проведено для условий Республики Марий Эл с использованием следующих значений входных параметров:

- место установки системы – 56,629° с. ш., 47,7516 в. д.;

– параметры фотоэлектрического модуля (КПД – 16%; площадь апертуры – 1,63 м²; угол наклона приемной поверхности к горизонту (при моделировании без концентратора и без устройства слежения за Солнцем) – 56°);

– количество фотоэлектрических модулей – 18 шт.;

– коэффициент концентрации солнечного излучения (для варианта системы с фотоэлектрическими модулями с концентрацией солнечной энергии) – 2;

– расчетная электрическая нагрузка на вводе в жилой дом с электрической плитой – 6 кВт, суточное потребление электроэнергии – 10,8 кВт·ч.

Результаты математического моделирования производства электроэнергии солнечной энергетической установкой представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты математического моделирования производства электроэнергии солнечной энергетической установкой

Месяц	$W_{\text{ФМ.накл.}}$, кВт·ч	$W_{\text{ФМ.слеж.}}$, кВт·ч	$W_{\text{ФМ.конц.}}$, кВт·ч	$W_{\text{ФМ}} - W_{\text{НГ}}$, кВт·ч			Реализовано, кВт·ч		
				накл.	слеж.	конц.	накл.	слеж.	конц.
Январь	110,2	115,3	228,2	-224,6	-219,5	-106,6	0,0	0,0	0,0
Февраль	208,2	243,5	482,2	-94,2	-58,9	179,8	0,0	0,0	179,8
Март	473,4	501,8	993,6	138,6	167,0	658,8	138,6	167,0	658,8
Апрель	707,8	754,5	1493,9	383,8	430,5	1169,9	383,8	430,5	1169,9
Май	941,3	1003,1	1986,3	606,5	668,3	1651,5	606,5	668,3	1651,5
Июнь	990,6	1038,7	2056,8	666,6	714,7	1732,8	666,6	714,7	1732,8
Июль	866,7	1017,6	2014,9	531,9	682,8	1680,1	531,9	682,8	1680,1
Август	777,9	819,5	1622,7	443,1	484,7	1287,9	443,1	484,7	1287,9
Сентябрь	408,8	557,4	1103,6	84,8	233,4	779,6	84,8	233,4	779,6
Октябрь	307,1	327,1	647,6	-27,7	-7,7	312,8	0,0	0,0	312,8
Ноябрь	137,1	144,6	286,4	-186,9	-179,4	-37,6	0,0	0,0	0,0
Декабрь	53,0	77,0	152,6	-281,8	-257,8	-182,2	0,0	0,0	0,0
W_{Σ} , кВт·ч	5982,0	6600,2	13068,9				2855,2	3381,5	9453,3

В колонке ($W_{\text{ФМ}} - W_{\text{НГ}}$, кВт·ч) некоторые значения получились отрицательными, что обусловлено превышением в соответствующие месяцы потребления электроэнергии электроприемниками сельского жилого дома количества электроэнергии, произведенного солнечной энергетической установкой. Эти значения представляют собой месячные объемы потребления электроэнергии из сети. Таким образом, солнечная энергетическая установка частично покрывала потребности в электроэнергии: так, в феврале для системы с фотоэлектрическими модулями, имеющими фиксированный наклон, объем потребления из сети составил 94,2 кВт·ч (при месячном потреблении электроэнергии

электроприемниками 302,4 кВт·ч). Наибольшие значения объемов реализованной электроэнергии характерны для летних месяцев, что обусловлено наибольшими значениями инсоляции. Применение устройств слежения за Солнцем позволяет увеличить годовой объем реализованной электроэнергии по сравнению с вариантом системы с фотоэлектрическими модулями, имеющими фиксированный наклон, на 18,4%. Однако наиболее эффективным с точки зрения объема реализованной электроэнергии является вариант системы с фотоэлектрическими модулями с концентрацией солнечной энергии. Количество электроэнергии, переданной в электрическую сеть за год, при использовании концентраторов более чем в три раза превышает аналогичный показатель для системы с фотоэлектрическими модулями, имеющими фиксированный наклон.

Стоимость реализованной за год электроэнергии (при цене 3,2 руб./кВт·ч) для трех вариантов системы составила: система с фотоэлектрическими модулями, имеющими фиксированный наклон, – 9,14 тыс. руб., система с устройством слежения за Солнцем – 10,82 тыс. руб., система с фотоэлектрическими модулями с концентрацией солнечной энергии – 30,25 тыс. руб.

Выводы

С точки зрения реализации сельскохозяйственными потребителями электрической энергии, произведенной фотоэлектрическими модулями, целесообразным является использование системы с сетевыми инверторами. Это обусловлено отсутствием необходимости в использовании аккумуляторных батарей, что упрощает систему и снижает капитальные и эксплуатационные затраты. Проведено математическое моделирование работы такой системы на примере сельского жилого дома для условий центральной части Республики Марий Эл. Анализ полученных результатов показал, что из рассмотренных вариантов солнечной энергетической установки наибольший объем реализованной электроэнергии обеспечивает система с фотоэлектрическими модулями с концентрацией солнечной энергии. Относительно варианта системы с фотоэлектрическими модулями, имеющими фиксированный наклон, применение концентраторов обеспечивает более чем трёхкратное увеличение (при коэффициенте концентрации солнечного излучения, равном 2) годового объема реализованной электроэнергии. Для варианта системы с устройством слежения за Солнцем (без концентраторов) аналогичный показатель составляет 18,4%.

Список использованных источников

1. Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации» № 471-ФЗ от 27.12.2019. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_341801/
2. Рамадан А., Елистратов В.В. Моделирование и управление сетевой ветроэнергетической установкой с асинхронным генератором двойного питания [Электрон. ресурс] // Материаловедение. Энергетика. – 2018. – №3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-upravlenie-setevoy-vetroenergeticheskoy-ustanovkoy-s-asinhronnym-generatorom-dvoynogo-pitaniya>
3. Попель О.С., Фрид С.Е., Ефимов Д.В., Анисимов А.М. Автономные ветровые энергоустановки с аккумуляторами тепла // Альтернативная энергетика и экология. – 2008. – № 11 (67). – С. 78-84.
4. Киселева С.В., Тарасенко А.Б., Игнатьев С.Г., Шакун В.В. Имитационная модель ветроэнергетической установки с гибридным накопителем электрической энергии // Материалы IV Международного конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность». – Москва: ОИВТ РАН. – 2018. – С. 98-103.
5. Бессель В.В., Мингалеева Р.Д., Павлюк В.Е. Повышение энергетической эффективности и надежности энергообеспечения удаленных объектов транспорта газа за счет применения гибридных ветродизельных электростанций [Электрон. ресурс] // Территория Нефтегаз. – 2019. – №3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-energeticheskoy-effektivnosti-i-nadezhnosti-energoobespecheniya-udalennyh-obektov-transporta-gaza-za-schet-primeneniya>
6. Саврасов Ф.В., Лукутин Б.В. Расчёт эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями в условиях западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 6. – С. 17-21.
7. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. Оптимизация состава и режимов работы фотодизельной системы электроснабжения постоянного тока // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 4 (153). – С. 795-809.
8. Фрид С.Е., Лисицкая Н.В., Попель О.С. Результаты анализа применимости данных спутниковых наблюдений и реанализа для моделирования автономных солнечных энергоустановок // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488. – № 6. – С. 609-611.
9. NASA Prediction of worldwide energy resources [Электрон. ресурс]. – 2020. – Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
10. Да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: учебное пособие; пер. с англ. под редакцией С.П. Малышенко, О.С. Попеля. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект»; М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – 704 с.

Осташенков А.П., Медяков А.А., Каменских А.Д., Воробьев К.М. Математическое моделирование
производства электроэнергии солнечной энергоустановкой для условий Республики Марий Эл

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
=====

Цитирование:

Осташенков А.П., Медяков А.А., Каменских А.Д., Воробьев К.М. Математическое моделирование производства электроэнергии солнечной энергоустановкой для условий Республики Марий Эл [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – №5. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/5/st_505.pdf. DOI: <https://doi.org/10.51419/20215505>.