

B. V. Bruslinovskiy, N. A. Dobroskok
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

V. S. Lavrinovskiy, R. I. Galiullin, O. V. Mokhova
Ship Electric Engineering and Technology Institute (KSRC Branch)

STABILITY ANALYSIS OF PIECEWISE DEFINITE NONLINEAR AMBIGUOUS SYSTEM BY DIRECT LYAPUNOV METHOD

Piecewise definite nonlinear ambiguous system including a couple of nonlinear elements where one of them possesses odd symmetric piecewise definite ambiguous hysteresis characteristic and other – piecewise linear odd symmetric relay characteristic is considered. The stability analysis questions using relay control system of separately excited DC generator with two excitation windings that ensures the reference pulse current series reproducing are investigated. To achieve a goal the direct Lyapunov method and Dini derivatives mathematical tool that suggests sufficient conditions of continuous differentiability requirement fulfillment which is made to the Lyapunov function are implemented. The Lyapunov function that allows judging about an asymptotic stability of the system is derived. The simulation results of the transients in DC generator armature circuit and the graphs of obtained Lyapunov function and its complete time derivative indicating the second Lyapunov theorem execution are given.

Separately excited DC generator, hysteresis, relay control system, direct Lyapunov method, Dini derivatives

УДК 620.92:620.97

Н. Нтавухоракомейе, М. П. Белов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Техническая методика расчета мощности солнечных электростанций в тропическом климате, как в республике Бурунди

Разработана техническая методика расчета мощности автономной солнечной электрической станции (АСЭС) и ее элементов в тропическом климате, которая позволяет учитывать меняющуюся нагрузку в течение суток и тем самым исключить необоснованное увеличение мощности элементов электрической станции, а также точно определить необходимую емкость аккумуляторных батарей (АКБ) и, следовательно, стоимость этой АСЭС. Для проектирования АСЭС определяется номинальную мощность солнечных элементов, их число, емкость АКБ, мощности контроллера заряда-разряда и инвертора. При данных условиях наиболее важными параметрами для расчета мощности АСЭС считаются: область расположения; общая площадь дома; численность помещений; применяемые электрические приборы; присутствие горячего водоснабжения и отопления; общая максимальная мощность всех электрических приборов; приблизительное время работы каждого потребителя электроэнергии. Данные проблемы в имеющейся литературе недостаточно отражены, а в приложении к тропическому климату, как в Республике Бурунди, вообще отсутствуют, поэтому разработка методики расчета мощности АСЭС и ее элементов особенно актуальна. Цель данного исследования – разработка методики расчета мощности АСЭС при тропических условиях, разделенной на семь основных этапов для удобства представления.

Автономная солнечная станция, солнечная батарея, солнечная электрическая станция, инвертор напряжения, аккумуляторная батарея, зарядное устройство

В настоящее время предлагается использовать возобновляемые источники энергии, отвечающие требованиям экологической безопасно-

сти и имеющие длительный срок службы [1]. Учитывая, что такие ресурсы, как уголь, нефть и природный газ, наносят вред окружающей среде,

назрела потребность инвестирования в восстанавливаемые (возобновляемые) источники энергии, которые позволяют производить электрическую энергию без ухудшения состояния окружающей среды. Одним из вариантов обеспечения электрического снабжения автономных домов является установка солнечной станции. В состав основного оборудования АСЭС входят солнечные элементы; контроллер заряда-разряда АкБ; аккумуляторные батареи; импульсные преобразователи постоянного напряжения, а также автономный инвертор напряжения для преобразования постоянного тока в переменный 220 В. Автономные солнечные электрические станции создаются для электрического снабжения дач, небольших загородных домов, площадок для занятия спортом и пр. [2].

Статья посвящена разработке методики расчета мощности автономных солнечных электрических станций в тропических условиях, как в Республике Бурунди, разделенной на семь основных этапов для удобства представления.

1. Расчет выходной мощности АСЭС. Чтобы рассчитать необходимую выходную мощность солнечных батарей, нужно знать, сколько энергии потребляется. Проектирование АСЭС начинается с составления списка всех приборов, потребляющих электроэнергию, с указанием их потребляемой мощности P , напряжения и внесения данных в табл. 1 следующим образом:

- оборудование, потребляющее переменное напряжение (табл. 1, 1–5), подключается к ведущей (основной) шине питания АСЭС через личные автономные инверторы напряжения АИН;

- если есть потребители постоянного напряжения, у которых значения напряжения отличаются от номинального значения напряжения основной шины, то они подключаются через импульсные преобразователи постоянного напряжения. ИППН может быть повышающего или понижающего типа. Потребители 6 и 7 к основной шине питания подключаются напрямую.

За основную принимают шину, к которой подключается АкБ АСЭС напрямую либо через повышающий ИППН (в ночное время), в данном случае – шину с напряжением 24 В, которое соответствует напряжению АкБ АСЭС.

Если в списке потребителей есть нагрузки различных типов и значений напряжения пита-

ния, их мощность должна быть пересчитана на основной шине АСЭС [2], [3]. В этом случае пересчитывают мощности отдельных нагрузок на основную шину согласно формуле

$$P_{oc\ i} = \frac{P_{н\ i}}{\eta_i}, \quad (1)$$

где $P_{oc\ i}$ – мощность i -го потребителя, которая пересчитана на основной шине АСЭС; $P_{н\ i}$ – мощность i -го потребителя; η_i – коэффициент полезного действия i -го АИН или i -го ИППН для потребителей переменного и постоянного токов соответственно (в табл. 1 КПД инвертора напряжения и ИППН принимают равным 0.8).

Коэффициент полезного действия принимается равным единице, если потребители постоянного тока подключаются к основной шине питания напрямую или питаются от отдельной АкБ с напряжением, меньшим напряжения АкБ этой АСЭС.

Затем надо обратить внимание, в течение какого времени используются электрические приборы за сутки, и записать эти данные в третью строку табл. 1; в четвертую строку следует вписать ежедневную потребность в энергии. Чтобы определить ежедневные потребности в электрической энергии W , нужно умножить суммарную мощность приборов на их время работы в день.

Чтобы снизить затраты на АСЭС, нужно рассмотреть нагрузочную способность электростанции, т. е. максимальное значение мощности, которое солнечная электростанция может выдавать, и составить суточный график изменения нагрузки. При расчете нагрузок АСЭС нужно проанализировать зависимость суммарной мощности нагрузок от интервала времени, т. е. узнать, какие приборы будут работать в данное время суток (отдельно или одновременно), и подсчитать, какая максимальная мощность потребуется для их питания при пиковой нагрузке. Однако нельзя допускать одновременную работу потребителей высокой мощности или большого количества потребителей низкой мощности – необходимо распределить нагрузку так, чтобы выходная мощность АСЭС в любой момент времени сводилась к минимуму (например, нужно, чтобы стиральная машина подключалась к сети только после отключения чайника (табл. 1)).

Характеристики	Нагрузка							
	1. Электрический чайник, АИН	2. Стиральная машина, АИН	3. Холодильник, АИН	4. Телевизор, АИН	5. Компьютер	6. Освещение	7. Другие	Итого
Напряжение, В; мощность, Вт	~220; 1000	~220; 1200	~220; 250	~220; 150	~220; 100	= 24; 100	= 24; 100	–
Мощность, пересчитанная на основной шине, Вт	1250	1500	312.5	187.5	125	100	100	3575
Предварительное время работы нагрузки, ч/сут	0.25	1	12	5	5	4	4	–
Потребление энергии, Вт·ч/сут	312.5	1500	3750	937.5	625	400	400	7925

Таблица 2

Потребитель	Потребляемая мощность, кВт	Часовая нагрузка P , кВт, и потребляемая энергия W , кВт·ч											
		P_1, W_1	P_2, W_2	P_3, W_3	P_4, W_4	P_5, W_5	P_6, W_6	P_7, W_7	P_8, W_8	P_9, W_9	P_{10}, W_{10}	P_{11}, W_{11}	P_{12}, W_{12}
Электрический чайник	1.250	–	–	–	–	–	–	1.25, 0.30	–	–	–	–	1.25, 0.30
Стиральная машина	1.500	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.50, 1.50	–	–
Холодильник	0.312	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3
Телевизор	0.187	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Компьютер	0.125	–	–	–	–	–	–	–	0.12, 0.12	0.12, 0.12	–	–	–
Освещение	0.100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Другое	0.100	–	–	–	–	–	–	–	0.10, 0.10	0.10, 0.10	–	0.10, 0.10	–
Итого:	P W	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	1.55, 0.60	0.52, 0.52	0.52, 0.52	1.80, 1.80	0.40, 0.40	1.55, 0.60

Общая мощность нагрузки в определенном интервале вычисляется по следующей формуле:

$$P_{nj} = \sum_{i=1}^N P_{oci}$$

где N – число потребителей, которые включены в сеть на j -м интервале времени.

Потребление электрической энергии и изменения нагрузки в доме с 1 до 12 ч показаны в табл. 2.

Изменения нагрузки и потребление электрической энергии в доме с 13 до 24 ч представлены в табл. 3.

На рис. 1 графически представлено часовое энергопотребление с 1 до 12 ч по табл. 2, а на рис. 2 – с 13 до 24 ч по табл. 3.

Вместе с тем, необходимо учитывать особенности работы некоторых электроприборов: когда приборов, потребляющих большую мощность (насос, электродрель и т. п.) много, но работают они редко, это может привести к тому,

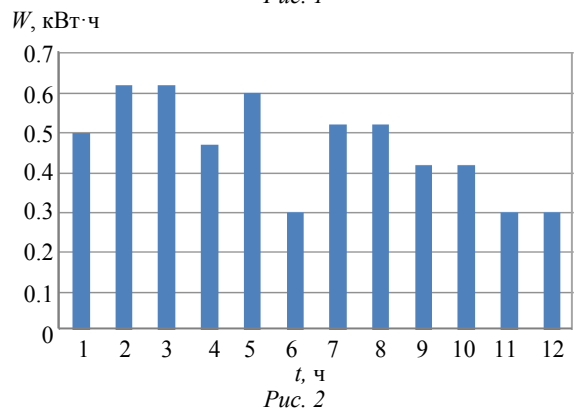
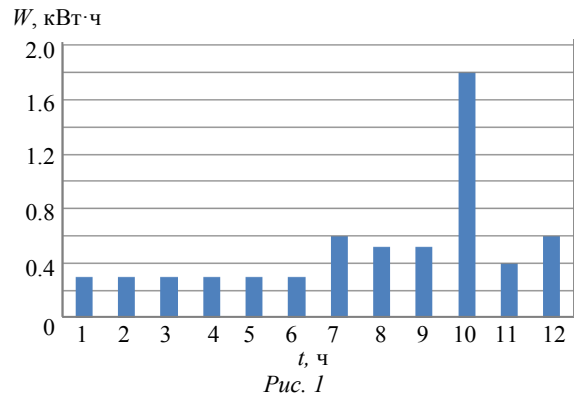


Таблица 3

Потребитель	Потребляемая мощность, кВт	Часовая нагрузка P , кВт, и потребляемая энергия W , кВт·ч											
		P_{13}, W_{13}	P_{14}, W_{14}	P_{15}, W_{15}	P_{16}, W_{16}	P_{17}, W_{17}	P_{18}, W_{18}	P_{19}, W_{19}	P_{20}, W_{20}	P_{21}, W_{21}	P_{22}, W_{22}	P_{23}, W_{23}	P_{24}, W_{24}
Электрический чайник	1.250	–	–	–	–	1.25, 0.30	–	–	–	–	–	–	–
Стиральная машина	1.500	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Холодильник	0.312	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3
Телевизор	0.187	0.2, 0.2	0.2, 0.2	0.2, 0.2	–	–	–	0.2, 0.2	0.2, 0.2	–	–	–	–
Компьютер	0.125	–	0.12, 0.12	0.12, 0.12	0.12, 0.12	–	–	–	–	–	–	–	–
Освещение	0.100	–	–	–	–	–	0.10, 0.10	0.10, 0.02	0.10, 0.02	0.10, 0.10	0.10, 0.10	–	–
Другое	0.100	–	–	–	0.10, 0.05	–	–	–	–	0.10, 0.02	0.10, 0.02	–	–
Итого:	P W	0.50, 0.50	0.62, 0.62	0.62, 0.62	0.52, 0.47	1.55, 0.60	0.4, 0.3	0.60, 0.52	0.60, 0.52	0.50, 0.42	0.50, 0.42	0.3, 0.3	0.3, 0.3

что получится автономная солнечная электростанция с огромной выходной мощностью, так как у таких электрических приборов мощность в 5–6 раз выше в момент пуска и инвертор должен кратковременно выдерживать мощность в 2–3 раза выше номинальной, что делает его дорогим. Тогда необходимо предусмотреть, чтобы не происходило одновременного подключения таких электроприборов – это удешевит систему АСЭС. Днем солнечная батарея обеспечит питанием потребителей и зарядит аккумуляторную батарею.

Так как в Республике Бурунди колебания температуры в течение года незначительны, интервалы дневного и ночного времени считаются равными и принимается $\Delta t_{д.в} = \Delta t_{н.в} = 12$ ч (6:00–18:00, 18:00–6:00) [4], [5], и, следовательно, назначается выходная мощность АСЭС как самая большая мощность потребителей, которая приходится на определенный интервал дневного времени суток:

$$P_H = \max \{P_H, j\}; \quad \forall j \in \overline{1, M}, \quad (2)$$

где M – количество выделенных временных интервалов, которые входят в дневное время суток.

Выходная мощность автономной солнечной электрической станции составит $P_H = 1800$ Вт в соответствии с табл. 2 и 3, и такая мощность станет применяться во всех остальных расчетах АСЭС.

В расчетном случае взят дом, где постоянно проживает 6 чел., которые потребляют 8 кВт·ч/сут (см. табл. 1).

Суммарная энергия за ночь в киловатт-часах (см. табл. 2 и 3)

$$\begin{aligned} \Sigma W_{ночь} &= W_{19} + W_{20} + W_{21} + W_{22} + W_{23} + W_{24} + \\ &+ W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 = \\ &= 0.52 + 0.52 + 0.42 + 0.42 + 0.30 + 0.30 + \\ &+ 0.30 + 0.30 + 0.30 + 0.30 + 0.30 + 0.30 = 4.28. \end{aligned}$$

Суммарная энергия за световой день в киловатт-часах (см. табл. 2 и 3)

$$\begin{aligned} \Sigma W_{день} &= W_7 + W_8 + W_9 + W_{10} + W_{11} + W_{12} + \\ &+ W_{13} + W_{14} + W_{15} + W_{16} + W_{17} + W_{18} = \\ &= 0.60 + 0.52 + 0.52 + 1.80 + 0.40 + 0.60 + 0.50 + \\ &+ 0.62 + 0.62 + 0.47 + 0.60 + 0.30 = 7.55. \end{aligned}$$

Суммарное энергопотребление за сутки в киловаттах

$$\begin{aligned} \Sigma W_{сут} &= \Sigma W_{ночь} + \Sigma W_{день} = \\ &= 4.28 + 7.55 = 11.83. \end{aligned}$$

Средняя мощность за ночь в киловаттах

$$P_{ср. ночь} = \frac{\Sigma W_{ср. ночь}}{T_{ночь}} = \frac{4.28}{12} = 0.356.$$

Средняя мощность за световой день в киловаттах

$$P_{ср. день} = \frac{\Sigma W_{ср. день}}{T_{день}} = \frac{7.55}{12} = 0.63.$$

На рис. 3 приведен график потребляемой энергии с 1 до 24 ч, пик которой достигает 1.8 кВт·ч.

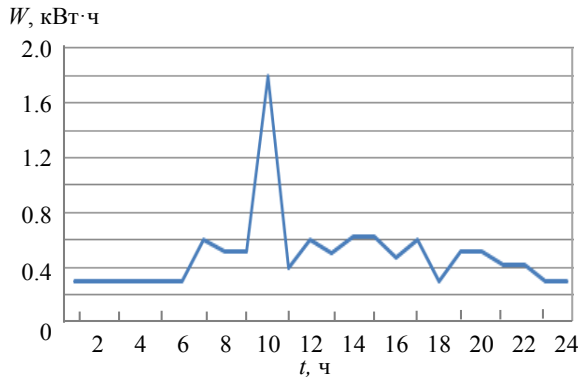


Рис. 3

Энергопотребление в жилых домах Республики Бурунди фактически не меняется. Обычно можно сказать, что энергопотребления днем, когда родители работают, а дети на учебе, нет. Электропотребление от аккумуляторной батареи достигает максимума вечером и ночью, когда все уже дома.

2. Расчет аккумуляторной батареи АСЭС.

Аккумуляторной батареей называют набор электрических аккумуляторов, соединенных параллельно или последовательно в зависимости от желаемого напряжения или емкости. После подсчета суточного энергопотребления автономной солнечной электрической станции нужно определить емкость аккумуляторной батареи для накопления энергии, которая будет потребляться в ночное время суток.

Энергоемкость аккумуляторной батареи выражается в ампер-часах и определяется произведением ее разрядной (зарядной) емкости на среднее разрядное (зарядное) напряжение (номинальное). Емкостью называется количество энергии, которое может быть сохранено в батарее и показывает, сколько времени полная заряженная АКБ может питать нагрузку.

Необходимо отметить, что при изменении температуры и режима разряда меняются и емкость аккумулятора, и его разрядное напряжение. При понижении температуры и увеличении разрядного тока энергия аккумулятора уменьшается более значительно, чем его емкость. Не рекомендуется допускать глубокого разряда, так как он может вывести аккумуляторную батарею из строя.

В ночное время питания нагрузок $\Delta t_{н.в}$ расход емкости ΔC аккумуляторной батареи АСЭС определяется выражением [2]

$$\Delta C = \frac{P_H}{U_H} \Delta t_{н.в} = \frac{P_H}{U_H} (24 - \Delta t_{д.в}), \quad (3)$$

где $\Delta t_{н.в} = \Delta t_{д.в} = 12$ ч – продолжительность ночного и дневного времени; P_H – номинальная мощность нагрузки; U_H – номинальное напряжение нагрузки.

У каждого вида АКБ есть своя величина допустимого разряда. Следует учитывать тот факт, что срок службы АКБ напрямую зависит от глубины разряда, поэтому для того чтобы аккумулятор служил дольше, его не надо разряжать более чем на 60–70 %.

Степень разряженности аккумуляторов АСЭС определяется проверкой концентрации (плотности) его электролита. Плотность электролита изменяется в зависимости от степени заряженности (разряженности) батареи. Более высокой плотности электролита соответствует и более высокая степень заряженности батареи, что выражается соотношением

$$S_p = \frac{C_H - C_{\min}}{C_H} \cdot 100 \% = \frac{\Delta C}{C_H} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где C_H – номинальная (требуемая) емкость аккумуляторной батареи АСЭС; C_{\min} – минимальная емкость АКБ.

Из (4) с учетом (3) получается уравнение для определения нужной емкости аккумулятора автономной солнечной электрической станции:

$$C_H = \frac{1}{S_p} \frac{P_H}{U_H} \Delta t_{н.в}. \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет при постоянной нагрузке хорошо рассчитать нужную емкость аккумулятора автономной солнечной электрической станции.

Отметим, что емкость и ток разряда аккумулятора $I_p = P_H/U_H$ будут меньше, если будет больше выходное напряжение; при этом снижается и стоимость АСЭС. Количество и емкость АКБ должны быть такими, чтобы энергии, запасаемой в них за день, хватило на темное время суток. Стоит отметить, что потребление электроэнергии в ночное время минимально по сравнению с дневной и вечерней активностью. Для того чтобы снизить стоимость системы, АСЭС выгодно иметь маленький ток – тогда уменьшатся омические потери и КПД системы увеличится, – поэто-

му лучше иметь автономную солнечную электростанцию с высоким напряжением.

Далее надо определить напряжение АкБ для накопления солнечной энергии. В системах АСЭС часто применяют 12, 24 или 48 В. Правило для этого достаточно простое: чем больше энергии используется, тем больше должно использоваться высокое напряжение, чтобы уменьшить потери энергии при ее транспортировке или хранении. Рекомендуются три случая, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Пиковая мощность фотоэлектрической системы, Вт	Рекомендуемое напряжение, В
От 0 до 800	12
От 800 до 1600	24
Выше 1600	48

Чтобы увеличить напряжение или емкость АкБ, аккумуляторы соединяются последовательно или параллельно:

- параллельно (подключив клеммы «+» к клеммам «+» и клеммы «-» к клеммам «-») – чтобы увеличить емкость аккумуляторной батареи АСЭС (в ампер-часах), сохраняя то же напряжение (в вольтах);
- последовательно – чтобы повысить напряжение аккумуляторной батареи АСЭС (в вольтах); емкость в ампер-часах остается емкостью одной батареи.

Для защиты от перегрузки устанавливается контроллер напряжения между панелью и аккумуляторной батареей.

Напряжение в АСЭС является очень важным фактором, влияющим на параметры других устройств системы.

Энергоемкость (энергетическая емкость) аккумуляторной батареи АСЭС вычисляют следующим образом:

$$W = C_H U_H \tag{6}$$

Число последовательно соединенных одиночных АкБ в ветви

$$n = U_H / U_{АкБ}, \tag{7}$$

где $U_{АкБ}$ – напряжение отдельной АкБ.

Число параллельных ветвей в АкБ АСЭС

$$m = C_H / C_{АкБ}, \tag{8}$$

где $C_{АкБ}$ – емкость отдельной АкБ.

При этом итоговое количество аккумуляторных батарей, входящих в аккумуляторную батарею автономной солнечной электростанции, определяется как

$$N = nm. \tag{9}$$

Если подставить в (9) выражения (5) и (8), получаем уравнение общего количества АкБ, которые входят в аккумуляторную батарею АСЭС:

$$N = \frac{1}{S_p} \frac{P_H}{W_{АкБ}} \Delta t_{H,B}, \tag{10}$$

где $W_{АкБ} = C_{АкБ} U_{АкБ}$ – энергетическая емкость одиночной АкБ. Необходимо отметить, что количество одиночных аккумуляторов системы будет тем меньше, чем выше энергетическая емкость при заданном напряжении аккумулятора.

Если выбирать аккумулятор определенной емкости из выражений (5) и (8), тогда напряжение U_H аккумуляторной батареи АСЭС определяется выражением

$$U_H = \frac{1}{S_p} \frac{P_H}{m C_{АкБ}} \Delta t_{H,B}, \tag{11}$$

Так как нагрузка системы нестабильна, ее изменение, в соответствии с табл. 2 и 3, на ночном интервале времени (с 18:00 до 6:00) с учетом местных условий [4], [5] представлено на графике (рис. 4). График изменения нагрузки представляется тремя значениями мощности: $P_{H1} = 600$ Вт, $P_{H2} = 400$ Вт и $P_{H3} = 300$ Вт.

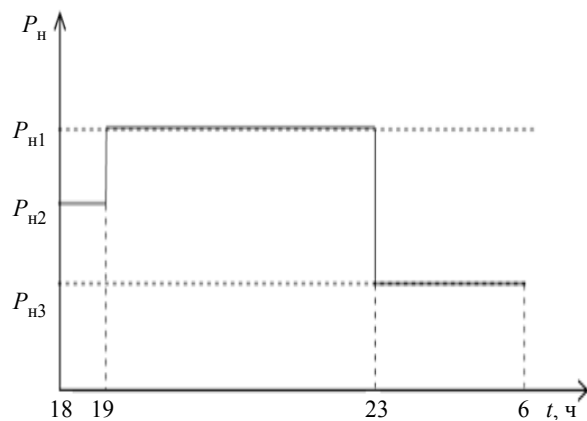


Рис. 4

Получается трехступенчатый график изменения нагрузки (рис. 5), соответствующий интервалам времени Δt_1 , Δt_2 и Δt_3 , если располагать интервалы времени, показанные на рис. 4, по значениям их нагрузок.

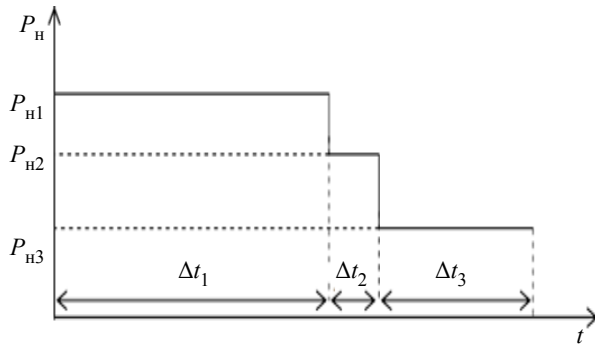


Рис. 5

На рис. 6 показан график изменения емкости АкБ автономной солнечной электрической станции при трехступенчатой нагрузке.

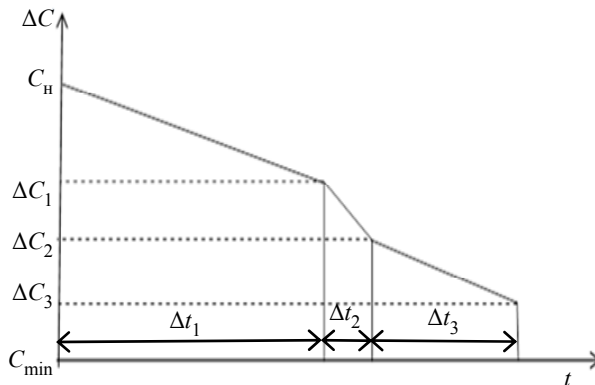


Рис. 6

Определяем расход емкости АкБ на 1-м интервале времени:

$$\Delta C_1 = \frac{P_{H1}}{U_H} \Delta t_1; \quad (12)$$

на 2-м интервале времени –

$$\Delta C_2 = \frac{P_{H2}}{U_H} \Delta t_2; \quad (13)$$

а на 3-м интервале –

$$\Delta C_3 = \frac{P_{H3}}{U_H} \Delta t_3; \quad (14)$$

Так как $\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3$, с учетом уравнений (4), (12)–(14) определяется требуемая емкость АкБ системы:

$$C_H = \frac{1}{S_p U_H} (P_{H1} \Delta t_1 + P_{H2} \Delta t_2 + P_{H3} \Delta t_3), \quad (15)$$

где C_H – номинальная (требуемая) емкость аккумуляторной батареи АСЭС.

3. Расчет мощности зарядного устройства АСЭС. Аккумулятор накапливает заряд, который равен емкости аккумулятора после полной зарядки.

Плотность электролита и конечное напряжение на зажимах аккумулятора являются факторами, ограничивающими разряд любой аккумуля-

торной батареи. Во всех режимах глубокое разряжение вызывает повреждение аккумулятора. Если аккумулятор достиг некоторого напряжения, которое называется пороговым, то он считается разряженным.

Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи сильно зависит от силы тока, температуры и степени разряженности; оно увеличивается по мере уменьшения температуры и разрядки аккумулятора. Повышение тока (заряда или разряда) сопровождается понижением внутреннего сопротивления.

Методы зарядки различаются в зависимости от типа аккумулятора: зарядка может проходить при постоянном напряжении, при постоянном токе или требовать иных методик заряда – существует нормальный (или медленный) заряд, быстрый заряд и т. д. Скорость заряда – это один из факторов, от которых зависит срок службы аккумулятора. При зарядке АкБ необходимо рассчитывать (устанавливать) зарядный ток.

Зарядка аккумулятора предпочтительно должна выполняться в три этапа:

1) при постоянном токе до 80 % заряда батареи: этот ток должен быть ограничен значением емкости от $C/3$ до $C/10$, в зависимости от производительности зарядного устройства (ЗУ);

2) при постоянном напряжении, при котором ток понижается;

3) при низком напряжении для компенсации саморазряда.

Не рекомендуется заряжать аккумулятор с большим зарядным током, чем указывается в техническом описании этих аккумуляторов (например: максимальный зарядный ток $I_{\max \text{ зар}} = 0.2C$ значит, что рекомендуемый зарядный ток составляет 20 % от емкости аккумулятора).

Следовательно, чтобы зарядить аккумулятор 12 В ($U_{\text{АкБ}} = 12 \text{ В}$), нужно иметь максимальный ток заряда $I_{\max \text{ зар}} = 0.2 C/t$, $t = 1 \text{ ч}$, и максимальное выходное напряжение ЗУ $U_{\max \text{ зар}} = 16.5 \text{ В}$. Если аккумуляторная батарея АСЭС состоит из n последовательно соединенных одиночных АкБ, то выходная мощность ЗУ [2]

$$P_{\text{ЗУ}} = n I_{\max \text{ зар}} U_{\max \text{ зар}} = 1.375 n I_{\max \text{ зар}} U_{\text{АкБ}} \cdot (16)$$

4. Расчет мощности основной шины АСЭС. Мощность основной шины автономной солнеч-

ной электрической станции определяется суммой мощностей нагрузки P_H и зарядного устройства $P_{ЗУ}$ аккумуляторной батареи с учетом его коэффициента полезного действия:

$$P_{о.ш} = P_H + P_{ЗУ} / \eta_2, \quad (17)$$

где η_2 – коэффициент полезного действия зарядного устройства АКБ.

5. Расчет мощности солнечных батарей АСЭС. Чтобы правильно выбрать солнечные батареи (СБ), необходимо рассчитать их мощность для получения нужной электрической энергии системы:

$$P_{СБ} = \frac{P_{о.ш}}{\eta_1} = \frac{P_H}{\eta_1} + \frac{P_{ЗУ}}{\eta_1 \eta_2}, \quad (18)$$

где η_1 – коэффициент полезного действия понижающего ИППН.

Электрические характеристики фотоэлектрических модулей (мощность, напряжение, ток) имеют первостепенную важность, но при их выборе нельзя не обращать внимание и на такие параметры, как габариты, конструктивное исполнение, вес.

Среднее значение интенсивности солнечного излучения в Республике Бурунди оценивается в 1800 Вт/м^2 , и энергия, вырабатываемая модулем мощностью P_w в течение выбранного периода, определяется следующим соотношением [5], [6]:

$$W = kE P_w / 1800,$$

где $k = 0.5$ – коэффициент поправки на потери мощности фотоэлектрических элементов, нагреваемых солнцем, учитывающий наклонное попадание лучей на их поверхность в течение дня (зимой $k = 0.7$); E – инсоляция за выбранный период.

Зная суммарную мощность солнечных батарей системы, можно найти количество солнечных батарей, деля ее на мощность одной солнечной батареи.

6. Расчет коэффициента полезного действия АСЭС. Коэффициент полезного действия автономной солнечной электростанции характеризует эффективность работы системы:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{СБ}} = \frac{P_H \eta_1 \eta_2}{P_H \eta_2 + P_{ЗУ}}. \quad (19)$$

7. Выбор преобразователя напряжения системы. Преобразователь напряжения (или инвертор) позволяет преобразовывать напряжение постоянного тока, который накапливается в аккумуляторе или генерируется генератором тока (фотоэлектрические солнечные панели), в переменное напряжение с частотой 50 Гц, которое затем можно использовать для питания нагрузки.

Выбор инвертора зависит от следующих его параметров:

- номинальная мощность;
- КПД;
- форма сигнала.

В данном случае для того чтобы определить мощность преобразователя, нужно суммировать мощности всех электрических устройств, подключенных к нему, и прибавить 30 % на полученную мощность из-за некоторых приборов, которые потребляют в 3–4 раза больше мощности при запуске. Мощность инвертора будет 1800 Вт.

В заключение можно сказать следующее:

1. С учетом тропического климата Республики Бурунди была разработана методика расчета АСЭС, которая позволяет учитывать суточное потребление электроэнергии (изменение нагрузки в течение дня и ночи).

2. Требуемая емкость АКБ системы определяется с учетом изменения графика нагрузки в течение суток.

3. Рассмотренная методика позволит устранить необоснованное увеличение мощности оборудования и увеличение стоимости самой автономной солнечной электрической станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности работы тонкопленочных солнечных модулей на основе кремния в составе электростанции на широте г. Чебоксары / Е. И. Теруков, М. З. Шварц, Е. С. Аронова, Г. П. Охоткин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. С. 222–224.

2. Охоткин Г. П. Методика расчета мощности солнечных электростанций // Вестн. Чуваш. ун-та. 2013. № 3. С. 222–230.

3. Основные принципы построения автономных солнечных электростанций. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7345> (дата обращения: 09.01.2019).

4. Восход и закат в Республике Бурунди. URL: <https://www.sunrise-and-sunset.com/fr/sun/burundi> (дата обращения: 27.12.2018).

5. Диагностическое исследование энергетического сектора в Республике Бурунди в рамках инициативы Генерального секретаря ООН. URL: <https://www.african-ctc.net/fileadmin/uploads/se4all/Do->

[cuments/Country_RAGAs/Burundi_Rapid_Assessment_Gap_Analysis_FR_.pdf](#) (дата обращения: 24.12.2018).

6. Альтернативная энергия. Солнечная инсоляция – справочные таблицы URL: <http://alternativenergy.ru/solnechnaya-energetika/312-solnechnaya-insolyaciya.html> (дата обращения: 01.12.2018).

N. Ntawuhorakomeye, M. P. Belov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

TECHNICAL METHOD OF CALCULATING POWER OF SOLAR POWER PLANTS IN TROPICAL CLIMATES AS IN THE REPUBLIC OF BURUNDI

Developed a technical method for calculating power of an autonomous solar power station (ASPS) and its elements in a tropical climate, which allows to take into account the changing load during the day and thus accurately determine the required capacity of the battery (batteries) and eliminate the unreasonable exaggeration of the power of the power station elements and an increase in the cost of this ASP.

To design ASP, it will be necessary to determine the nominal power of the solar modules, their number, the battery capacity, the power of the charge-discharge controller and the inverter.

In this case, important parameters for calculating the power of ASES are: location area, total area of the house, the number of rooms, used electrical appliances, the presence of hot water and heating; the total maximum power of all electrical appliances, the approximate working time of electrical appliances. These problems in the available literature are not fully reflected, namely, in a tropical climate like in the Republic of Burundi are completely absent, therefore the development of a method for calculating power of the ASP and its elements is a relevant issue. The purpose of this research is to develop a method for calculating power of the ASP under tropical conditions as in the Republic of Burundi, which is divided into seven basic steps for ease of presentation.

Autonomous solar plant, solar module, solar power station, voltage inverter, storage battery, battery charger
