

## Литература

1. Михеев Г.М. Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль электрооборудования / Г.М. Михеев. М.: ИД «Додэка ХХI», 2010. 224 с.
2. Якобсон И.Я. Наладка и эксплуатация переключающих устройств силовых трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 120 с.

---

МИХЕЕВ ГЕОРГИЙ МИХАЙЛОВИЧ. См. с. 207.

КАЛАНДАРОВ ХУСЕЙНДЖОН УМАРОВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (huseinjon.86@mail.ru).

KALANDAROV KHUSEYNDZHON UMAROVICH – post-graduate student of Electric Power Industry Chair, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

---

УДК 620.92:620.97:620.4

ББК 363

Г.П. ОХОТКИН

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Ключевые слова:* солнечный модуль, солнечная электростанция, автономная солнечная электростанция, импульсный преобразователь постоянного напряжения, автономный инвертор напряжения.

*Разработана методика расчета мощности автономных солнечных электростанций и ее элементов, позволяющая учитывать изменение нагрузки в течение суток и тем самым точно определять требуемую емкость аккумуляторной батареи и исключить неоправданное завышение мощности элементов электростанции и удорожание самой автономной солнечной электростанции.*

G.P. OKHOTKIN

### THE METHOD OF CALCULATING POWER OF SOLAR POWER

*Key words:* solar module, solar power station; Autonomous solar power; pulse Converter DC voltage; Autonomous inverter voltage.

*Developed the method of calculating power of the Autonomous solar power and its elements, which allows to take into account the variation of the load during the day and thus accurately determine the required capacity of the battery and to exclude unjustified over-estimation of the capacity of elements of the power plant and the appreciation of the Autonomous solar power plant.*

Выработка электроэнергии при помощи электростанций на солнечных элементах применяется сегодня практически во всем мире и объемы использования солнечных батарей постоянно растут. Этому способствуют множество факторов, основными из которых являются использование альтернативных (возобновляемых) источников энергии, которые в последнее время приобретают все большую актуальность и полное отсутствие каких-либо движущихся частей, благодаря чему срок их службы практически не ограничен [1]. Электростанции на солнечных элементах постоянно совершенствуются. Сегодня они могут использоваться как дополнительные источники электроснабжения, работающие совместно с другими или полностью автономные.

Солнечные электростанции, не связанные с промышленной электросетью, т.е. автономные солнечные электростанции (АСЭ), предназначены для электроснабжения небольшого загородного дома, дачи, спортивных площадок, узлов связей и т.д., т.е. потребителей, удаленных от электросетей, подведение электричества для которых обычно влечет высокие финансовые и трудовые затраты.

Бывают АСЭ со стабилизированным и нестабилизированным выходным напряжением [2]. Функциональные схемы автономных солнечных электростанций состоят из солнечных батарей, необходимой мощности – для преобразования солнечного све-

та в электроэнергию; импульсных преобразователей постоянного напряжения – для приведения плавающего напряжения солнечных модулей и аккумуляторных батарей к стабильному напряжению и зарядки аккумуляторных батарей, которые могут быть объединены в контроллер заряда-разряда аккумуляторных батарей; аккумуляторных батарей – для аккумулирования и хранения электроэнергии; автономного инвертора напряжения – для преобразования постоянного тока в переменный 220 В и питания бытовых электроприборов.

Для проектирования автономных солнечных электростанций требуется определение номинальной мощности солнечных модулей, их количества, ёмкости аккумуляторных батарей, мощностей инвертора и контроллера заряда-разряда. При этом необходимыми данными для расчета мощности солнечной электростанции являются: район расположения; существующие подводки (если они имеются); общая площадь дома; количество помещений; используемые электроприборы; наличие отопления и горячего водоснабжения; суммарная максимальная мощность всех электроприборов; примерное время работы каждого электропотребителя.

Данные вопросы в доступной литературе освещены недостаточно полно, поэтому разработка методики расчета мощности автономных солнечных электростанций и ее элементов, является актуальной задачей.

Целью данного исследования является разработка методики расчета мощности автономных солнечных электростанций, которая для удобства представления разбита на несколько основных этапов. Рассмотрим подробнее методику расчета по предложенным этапам.

**Этап 1. Расчет выходной мощности АСЭ.** При проектировании автономной солнечной электростанции сначала нужно составить список всех потребителей электроэнергии, выяснить их потребляемую мощность, напряжение и внести в список (табл. 1). Потребители переменного напряжения (№ 1-№ 4, табл. 1) подключаются к основной шине питания АСЭ через индивидуальные автономные инверторы напряжения, а потребители постоянного напряжения Н1, Н2 (№ 7 и № 8, табл. 1) со значениями напряжения, отличающимися от номинального значения напряжения основной шины – через импульсные преобразователи постоянного напряжения как повышающего, так и понижающего типов. Потребитель (№ 5, табл. 1) подключается «напрямую» к основной шине питания, а потребитель (№ 6, табл. 1) подключен к дополнительной шине питания, т.е. к отдельной аккумуляторной батарее АСЭ. За основную шину питания, принимается шина, к которой в ночное время суток подключается аккумуляторная батарея АСЭ либо напрямую, либо через повышающий ИППН. В нашем примере в качестве основной шины питания принята шина с напряжением = 24 В, соответствующим напряжению аккумуляторной батареи АСЭ.

В случае присутствия в списке потребителей нагрузок с различными типами и значениями напряжений питания необходимо пересчитать их мощности на основную шину питания АСЭ. Тогда мощности отдельных нагрузок на основную шину питания пересчитываются по формуле:

$$P_{oc,i} = P_{n,i} / \eta_i, \quad (1)$$

где  $P_{n,i}$  – мощность  $i$ -го потребителя;  $P_{oc,i}$  – мощность  $i$ -го потребителя, пересчитанная на основную шину АСЭ;  $\eta_i$  – КПД  $i$ -го автономного инвертора напряжения или  $i$ -го импульсного преобразователя постоянного напряжения для потребителей, соответственно, переменного и постоянного токов (в табл. 1 КПД АИН и ИППН принимается равным 0,8). Если потребитель постоянного тока подключается к основной шине питания «напрямую» или питается от отдельной аккумуляторной батареи напряжением, меньшим напряжения аккумуляторной батареи АСЭ (№ 6, табл. 1), то в формуле пересчета (1) КПД принимается равным единице.

Затем нужно оценить, сколько времени в течение суток используются те или другие электроприборы, и, умножив мощность прибора на время его работы, определить еже-

дневную потребность в электроэнергии, эти данные записать в соответствующие колонки таблицы. Так составляется таблица общего энергопотребления за сутки.

Таблица 1

Таблица общего энергопотребления за сутки

№ п/п	Нагрузка	Напряжение, мощность	Мощность на основной шине, Вт	Время работы, ч/сут.	Энергопотребление, Вт·ч/сут.
1.	Электрический чайник, АИН	~ 220 В, 1000 Вт	1250	0,25	312,5
2.	СВЧ-печь, АИН	~ 220 В, 1200 Вт	1500	0,25	375
3.	Холодильник, АИН	~ 220 В, 250 Вт	312,5	12	3750
4.	Телевизор, АИН	~ 220 В, 150 Вт	187,5	4	750
5.	Освещение зала	= 24 В, 100 Вт	100	4	400
6.	Освещение кухни и туалета	= 12 В, 50 Вт	50	5	250
7.	Потребитель Н1, ИППН	= 48 В, 120 Вт	150	5	750
8.	Потребитель Н2, ИППН	= 12 В, 90 Вт	112,5	3	337,5
	<b>Итого</b>		<b>3662,5</b>		<b>6925</b>

Солнечная электростанция может питать много электроприборов при условии, что их энергопотребление не превышает количества электроэнергии, произведенной АСЭ. Список потребителей электроэнергии содержит нагрузки, работающие либо постоянно, либо непостоянно (редко, очень редко). В свою очередь, нагрузки, работающие непостоянно, подразделяются на нагрузки, работающие с фиксированным и плавающим интервалом работы (например, холодильник – № 3, табл. 1). Игнорирование этих факторов может привести к неоправданному завышению выходной мощности и удорожанию автономной солнечной электростанции. Поэтому необходимо правильно определить выходную мощность автономной солнечной электростанции.

Для удешевления АСЭ необходимо составить график изменения нагрузки за сутки, т.е. зависимости суммарной мощности нагрузки потребителей, работающих в текущий момент времени, от времени в течение суток. При этом необходимо исключить одновременную работу потребителей большой мощности или большого числа потребителей малой мощности и распределить подключение нагрузок во времени так, чтобы выходная мощность АСЭ стремилась к минимуму. Например, примем, что СВЧ-печь подключается к сети только после выключения электрического чайника (№ 1 и № 2, табл. 1). Причем для гарантии последовательного подключения потребителей и удешевления АСЭ их подключение должно производиться к одному АИН с одной розеткой подключения.

При составлении графика изменения нагрузки не представляется возможным точно определить интервалы включения нагрузок с плавающим интервалом работы (холодильник, табл. 1). Поэтому при составлении графика изменения нагрузки для упрощения принимаем, что такие нагрузки являются постоянно действующими.

С учетом вышеприведенных обстоятельств составляется график изменения нагрузки за сутки в виде таблицы (табл. 2). Суммарные мощности нагрузок на выделенных интервалах времени рассчитываются по формуле

$$P_{n,j} = \sum_{i=1}^N P_{oc,i}, \quad (2)$$

где  $N$  – число потребителей, включенных в сеть на  $j$ -м интервале времени.

Таблица 2

График изменения нагрузки за сутки

№ п/п	Нагрузка	Мощность нагрузки на интервалах времени, Вт												
		С 7 <sup>00</sup> до 7 <sup>05</sup>	С 7 <sup>05</sup> до 7 <sup>10</sup>	С 7 <sup>10</sup> до 8 <sup>00</sup>	С 8 <sup>00</sup> до 12 <sup>00</sup>	С 12 <sup>00</sup> до 12 <sup>05</sup>	С 12 <sup>05</sup> до 12 <sup>10</sup>	С 12 <sup>10</sup> до 14 <sup>00</sup>	С 14 <sup>00</sup> до 17 <sup>00</sup>	С 17 <sup>00</sup> до 17 <sup>05</sup>	С 17 <sup>05</sup> до 17 <sup>10</sup>	С 17 <sup>10</sup> до 19 <sup>00</sup>	С 19 <sup>00</sup> до 23 <sup>00</sup>	С 23 <sup>00</sup> до 7 <sup>00</sup>
1.	Электрический чайник	1250				1250				1250				
2.	СВЧ-печь		1500				1500				1500			
3.	Холодильник	312,5			312,5		312,5		312,5		312,5		312,5	312,5
4.	Телевизор												187,5	
5.	Освещение зала												100	
6.	Освещение кухни и туалета	50					50				50			
7.	Потребитель Н1			150				150				150		
8.	Потребитель Н2								112,5					
	<b>Итого</b>	<b>1612,5</b>	<b>1862,5</b>	<b>512,5</b>	<b>312,5</b>	<b>1612,5</b>	<b>1862,5</b>	<b>512,5</b>	<b>425</b>	<b>1612,5</b>	<b>1862,5</b>	<b>512,5</b>	<b>600</b>	<b>312,5</b>

Такие электроприборы, как холодильник, насосы, электродрель и ряд других, в момент пуска потребляют мощность в 5-6 раз больше «паспортной». Если таких потребителей с высокой мощностью достаточно много, то это может привести к увеличению выходной мощности и удорожанию автономной солнечной электростанции. В этом случае целесообразно исключить одновременное включение таких электроприборов и осуществить потребление пусковых мощностей от аккумуляторных батарей.

В течение дневного времени суток солнечная батарея заряжает аккумуляторную батарею и обеспечивает питанием потребителей. Принимаем за интервал дневного времени суток: летом  $\Delta t_{дв} = 14$  ч (с 6<sup>00</sup> до 20<sup>00</sup>), зимой  $\Delta t_{дв} = 8$  ч (с 8<sup>00</sup> до 16<sup>00</sup>). Тогда выходная мощность автономной солнечной электростанции определяется как максимальная мощность нагрузки за интервал летнего дневного времени суток по формуле

$$P_n = \max\{P_{n,j}\}, \forall j \in \overline{1, M}, \tag{3}$$

где  $M$  – число выделенных интервалов времени, входящих в интервал летнего дневного времени суток.

Согласно табл. 2 выходная мощность автономной солнечной электростанции составляет  $P_n = 1862,5$  Вт, которая будет использоваться для расчета мощности солнечной батареи АСЭ.

Рассмотренная выше методика расчета выходной мощности АСЭ учитывает изменение во времени значения мощности нагрузки и является общим случаем. В частном случае нагрузка АСЭ не изменяется, т.е. является постоянной. К таким потребителям относятся сотовые станции, системы оперативного питания электрических станций и подстанций, светофоры и др. В этом случае выходная мощность автономной солнечной электростанции должна соответствовать суммарной мощности нагрузок.

**Этап 2. Расчет емкости аккумуляторной батареи АСЭ.** В ночное время суток накопленная в аккумуляторной батарее автономной солнечной электростанции энергия потребляется нагрузкой. Энергия (энергоемкость) аккумуляторной батареи определяется как произведение ее емкости на номинальное напряжение. Емкость показывает потенциал аккумуляторной батареи, т.е. сколько времени она сможет питать нагрузку, если будет полностью заряжен. Емкость измеряется в ампер-часах. По мере разряда напряжение и энергоемкость аккумуляторной батареи падают. Расход емкости  $\Delta C$  аккумуляторной батареи АСЭ за время питания нагрузки  $\Delta t_{нв}$  определяется как

$$\Delta C = \frac{P_n}{U_n} \Delta t_{нв} = \frac{P_n}{U_n} (24 - \Delta t_{дв}), \tag{4}$$

где  $P_n$  – номинальная мощность нагрузки;  $U_n$  – номинальное напряжение нагрузки;  $\Delta t_{\text{нв}}$  – интервал ночного времени суток (в летнее время  $\Delta t_{\text{нв}} = 10$  ч, зимой –  $\Delta t_{\text{нв}} = 16$  ч);  $\Delta t_{\text{дв}}$  – интервал дневного времени суток.

Глубокий разряд может вывести аккумулятор из строя. Поэтому производители аккумуляторов устанавливают конечное напряжение разряда, при достижении которого аккумулятор необходимо отключать от нагрузки и заряжать. Чтобы аккумулятор служил долго, его нельзя разряжать более чем на 70-80%. Степень разряженности аккумуляторной батареи АСЭ

$$S_p = \frac{C_n - C_{\text{min}}}{C_n} 100\% = \frac{\Delta C}{C_n} 100\%. \quad (5)$$

Выразив из (5) емкость  $C_n$  с учетом (4) получаем выражение для определения требуемой емкости аккумуляторной батареи АСЭ в виде

$$C_n = \frac{100}{S_p} \frac{P_n}{U_n} \Delta t_{\text{нв}}. \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет легко рассчитать требуемую емкость аккумуляторной батареи АСЭ при постоянной нагрузке. Наиболее тяжелым режимом эксплуатации аккумуляторных батарей АСЭ является зимнее время, поэтому при расчетах по формуле (6) принимают  $\Delta t_{\text{нв}} = 16$  ч, а степень разряженности аккумуляторной батареи –  $S_p = 70\%$ .

Чем больше выходное напряжение АСЭ, тем меньше емкость, ток разряда  $I_p = P_n/U_n$  аккумуляторной батареи и ниже ее цена. Для стационарных (промышленных) свинцовых аккумуляторов максимальный ток разряда ограничен значением, которое численно в амперах составляет от 5 до 25 емкостей аккумулятора. Чем меньше ток АСЭ, тем меньше омические потери мощности, выше КПД и, следовательно, ниже стоимость солнечной электростанции. Поэтому выгодно иметь электрические системы высокого напряжения. Причем, чем больше мощность электростанции, тем больше выигрыш высоковольтной системы по сравнению с низковольтной.

В прошлом почти во всех фотоэлектрических системах использовалось постоянное напряжение 12 В, поэтому широко применялись приборы на 12 В, питавшиеся прямо от батареи. С появлением эффективных и надежных инверторов все чаще в АСЭ используется напряжение 24, 48 В и выше. Так, автономные солнечные электростанции, производящие и потребляющие менее 1000-1500 Вт·ч в день, лучше всего сочетаются с напряжением в 12 В. АСЭ, производящие 1000-3000 Вт·ч в день, обычно используют напряжение 24 В, а АСЭ, производящие более 3000 Вт·ч в день, используют 48 В и выше.

Напряжение в системе – очень важный фактор, который влияет на параметры инвертора, средств управления, зарядного устройства и электропроводки. Однажды купив все эти компоненты, их трудно заменить. Некоторые компоненты системы, например, фотоэлектрические модули, можно переключить с 12 В на более высокое напряжение, другие – инвертор, проводка и средства контроля – предназначены для определенного напряжения и могут работать только в его рамках.

Аккумуляторная батарея АСЭ с емкостью  $C_n$  набирается из отдельных серийно производимых аккумуляторных батарей небольшой емкости путем последовательного и параллельного их соединения. Последовательное соединение отдельных аккумуляторных батарей используется для увеличения напряжения, а емкость ветви аккумуляторной батареи при этом соответствует емкости отдельной аккумуляторной батареи. Получившаяся при параллельном соединении аккумуляторная батарея имеет то же напряжение, что и одиночная аккумуляторная батарея, а емкость такой аккумуляторной батареи равна сумме емкостей входящих в нее одиночных аккумуляторных батарей.

Энергоемкость аккумуляторной батареи автономной солнечной электростанции вычисляется как

$$W = C_n U_n. \quad (7)$$

Число последовательно включенных одиночных аккумуляторных батарей в ветви

$$n = U_n / U_{аб}, \tag{8}$$

где  $U_{аб}$  – напряжение отдельной аккумуляторной батареи.

Число параллельных ветвей в аккумуляторной батарее АСЭ

$$m = C_n / C_{аб}, \tag{9}$$

где  $C_{аб}$  – емкость отдельной аккумуляторной батареи.

Тогда общее число отдельных аккумуляторных батарей в аккумуляторной батарее АСЭ соответствует

$$N = nm. \tag{10}$$

Подставив в (10) уравнения (6)-(9), получаем соотношение для определения общего числа одиночных аккумуляторных батарей, входящих в аккумуляторную батарею АСЭ в виде:

$$N = \frac{100}{S_p} \frac{P_n}{W_{аб}} \Delta t_{нв}, \tag{11}$$

где  $W_{аб} = C_{аб}U_{аб}$  – энергоемкость отдельной аккумуляторной батареи. Чем больше энергоемкость или емкость при заданном напряжении аккумулятора, тем меньше отдельных аккумуляторов потребуется в аккумуляторную батарею АСЭ. Выбрав аккумулятор заданной емкости из уравнений (6) и (9), можно составить выражение для определения напряжения аккумуляторной батареи АСЭ в виде

$$U_n = \frac{100}{S_p} \frac{P_n}{m C_{аб}} \Delta t_{нв}. \tag{12}$$

В общем случае нагрузка АСЭ непостоянная, т.е. изменяется во времени. Изменение нагрузки согласно табл. 2 на интервале ночного времени суток (с 16<sup>00</sup> до 8<sup>00</sup>) можно аппроксимировать графиком, представленным на рис. 1. Для упрощения графика нагрузка представлена двумя значениями  $P_{н1} = 1863$  Вт и  $P_{н2} = 600$  Вт на пяти интервалах времени. Объединяя представленные на графике (рис. 1) интервалы времени с одинаковыми значениями нагрузок, получаем двухступенчатый график изменения нагрузки (рис. 2, а). Интервалы времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ , определенные как сумма интервалов времени с нагрузкой  $P_{н1}$  и  $P_{н2}$ , соответственно, равны  $\Delta t_1 = 1/3$  ч и  $\Delta t_2 = 15 \cdot 2/3$  ч.

График изменения емкости аккумуляторной батареи автономной солнечной электростанции при двухступенчатой нагрузке представлен на рис. 2, б. На первом интервале времени расход емкости аккумуляторной батареи определяется как

$$\Delta C_1 = \frac{P_{н1}}{U_n} \Delta t_1, \tag{13}$$

а на втором –

$$\Delta C_2 = \frac{P_{н2}}{U_n} \Delta t_2. \tag{14}$$

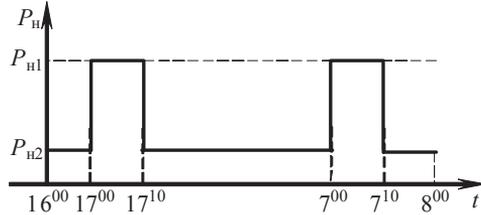


Рис. 1. Упрощенный график изменения нагрузки

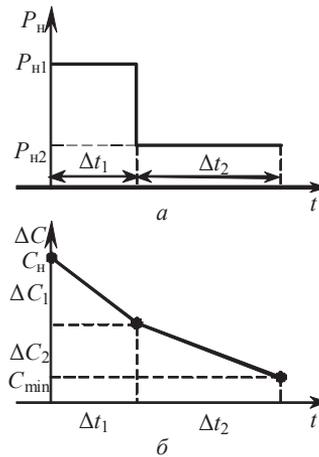


Рис. 2. Графики изменения нагрузки (а) и ёмкости АБ (б)

Учитывая, что  $\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2$ , из (5), (13) и (14) получаем выражение для определения требуемой емкости аккумуляторной батареи автономной солнечной электростанции в виде

$$C_H = \frac{100}{S_p U_H} (P_{H1} \Delta t_1 + P_{H2} \Delta t_2). \quad (15)$$

Очевидно, что расчет по уравнению (15) дает завышенную требуемую емкость аккумуляторной батареи. Для более точного определения требуемой емкости необходимо как можно точнее учесть изменение графика нагрузки на интервале ночного времени суток.

**Этап 3. Расчет мощности зарядного устройства АСЭ.** Зарядка аккумулятора – процесс обратный разрядке аккумулятора – во время зарядки, аккумулятор запасает энергию, питаясь от внешнего источника тока или солнечной батареи. После полной зарядки аккумулятор накапливает заряд, равной емкости аккумулятора.

В практике эксплуатации аккумуляторных батарей пользуются, как правило, одним из двух методов заряда батареи: заряд при постоянстве тока или заряд при постоянстве напряжения. Оба эти метода равноценны с точки зрения их влияния на долговечность батареи.

Заряд при постоянстве тока производится током, значение которого равно 10% от номинальной емкости при 20-часовом режиме разряда. Для большинства стационарных свинцовых аккумуляторов этот ток написан на его корпусе. Максимальное значение зарядного тока составляет от 0,2 до 0,3 емкости аккумулятора. Для поддержания постоянного тока в течение всего процесса заряда необходимо регулирующее устройство. Недостаток такого способа заряда – необходимость постоянного контроля и регулирования зарядного тока, а также обильное газовыделение в конце заряда. Для снижения газовыделения и повышения степени заряженности батареи целесообразно ступенчатое снижение силы тока по мере увеличения зарядного напряжения. Когда напряжение достигнет 14,4 В, зарядный ток уменьшают в два раза и при таком токе продолжают заряд до начала газовыделения. При заряде батарей, которые не имеют отверстий для доливки воды, целесообразно при увеличении зарядного напряжения до 15 В еще раз уменьшить ток в два раза. Батарея считается полностью заряженной, когда ток и напряжение при заряде сохраняются без изменения в течение одного-двух часов. Для современных необслуживаемых батарей такое состояние наступает при напряжении 16,3-16,4 В.

Температура электролита во время заряда батарей возрастает, поэтому необходимо контролировать ее значение, особенно к концу заряда. Если к концу заряда плотность электролита отличается от нормы, необходимо произвести корректировку доливкой дистиллированной воды в случаях, когда плотность выше нормы, или доливкой раствора серной кислоты плотностью 1,4 г/см<sup>3</sup>, когда она ниже нормы.

При заряде при постоянстве напряжения степень заряженности аккумуляторной батареи по окончании заряда напрямую зависит от значения зарядного напряжения. Так, например, за 24 ч непрерывного заряда при напряжении 14,4 В полностью разряженная 12-вольтовая батарея зарядится на 75-85%. При напряжении 15 В – на 85-90%, а при напряжении 16 В – на 95-97%. Полностью зарядить разряженную батарею в течение 20-24 ч можно при напряжении зарядного устройства 16,3-16,4 В. В первый момент включения зарядного устройства ток может достигать 40-50 А и более. Поэтому зарядное устройство должно снабжаться схемными решениями, ограничивающими максимальный ток заряда.

Для полного заряда аккумуляторных батарей в сокращенное время применяется ускоренный комбинированный способ заряда, заключающийся в заряде в два этапа. На первом этапе заряд осуществляется постоянным током до достижения напряжения 14,5 В, на втором этапе – при постоянном напряжении 13,8 В. Иногда этот метод быстрой зарядки называют заряд методом I-U (ток-напряжение). Метод позволяет полностью зарядить свинцовый аккумулятор примерно за шесть часов при начальном токе заряда 20% от ем-

кости. Быстрый заряд чаще применяется при эксплуатации аккумуляторов в циклическом режиме, т.е. в АСЭ.

Исходя из вышесказанного, следует, что для заряда 12-вольтового аккумулятора ( $U_{аб} = 12$  В) необходимо иметь максимальный ток заряда  $I_{\max,зар} = 0,2$  С/1 ч и максимальное выходное напряжение зарядного устройства  $U_{\max,зар} = 16,5$  В. В общем случае аккумуляторная батарея автономной солнечной электростанции состоит из  $n$  последовательно включенных одиночных аккумуляторных батарей. В этом случае выходная мощность зарядного устройства равняется:

$$P_{зы} = nI_{\max,зар}U_{\max,зар} = 1,375nI_{\max,зар}U_{аб}. \quad (16)$$

Зарядка свинцовых аккумуляторов, соединенных последовательно, представляет опасность. При зарядке соединенных последовательно аккумуляторов с разными емкостями их параметры (энергоемкость, напряжение) все больше и больше расходятся, т.е. «разбегаются». Поэтому на практике широко применяют зарядку отдельных аккумуляторов от индивидуальных зарядных устройств. Для отдельного заряда аккумуляторных батарей потребуется  $n$  зарядных устройств в  $n$  раз меньшей мощности.

**Этап 4. Расчет мощности основной шины АСЭ.** Все потребители электроэнергии и зарядное устройство аккумуляторной батареи автономной солнечной электростанции питаются через основную шину. Для правильного выбора сечения основной шины и определения мощности солнечных батарей АСЭ необходимо знать пропускную мощность основной шины. Пропускная мощность основной шины АСЭ определяется как сумма мощностей нагрузки и заряда аккумуляторной батареи:

$$P_{ош} = P_{н} + P_{зы}/\eta_2, \quad (17)$$

где  $P_{н}$  – мощность нагрузки АСЭ;  $P_{зы}$  – мощность зарядного устройства АСЭ;  $\eta_2$  – КПД зарядного устройства АСЭ.

**Этап 5. Расчет мощности солнечных батарей АСЭ.** Расчет мощности солнечных батарей необходим для правильного их выбора и обеспечения необходимым количеством электроэнергии автономной солнечной электростанции. Требуемая мощность солнечной батареи определяется соотношением

$$P_{сб} = P_{ош}/\eta_1 = P_{н}/\eta_1 + P_{зы}/\eta_1\eta_2, \quad (18)$$

где  $\eta_1$  – КПД импульсного преобразователя постоянного напряжения понижающего типа.

Количество вырабатываемой электроэнергии солнечной батареей зависит от погодных условий. Для учета этого фактора необходимо определить количество солнечной энергии, на которое можно рассчитывать в данной местности. Обычно эти данные можно получить у местного поставщика солнечных батарей или на гидрометеостанции. При этом важно учитывать два фактора: среднегодовую солнечную радиацию, а также ее среднемесячные значения при наихудших погодных условиях.

С помощью первого фактора фотоэлектрическую систему можно рассчитать в соответствии со среднегодовой солнечной радиацией, т.е. в некоторые месяцы будет больше энергии, чем требуется, а в другие – меньше. При выборе второго фактора всегда будет, как минимум, достаточно энергии для удовлетворения потребностей, если исключить чрезвычайно продолжительные периоды плохой погоды.

Теперь можно подсчитать номинальную мощность фотоэлектрического модуля.

Взяв из таблиц значение солнечной радиации за интересующий нас период и разделив его на 1000, получим так называемое количество пикочасов, т.е. условное время, в течение которого солнце светит как бы с интенсивностью 1000 Вт/м<sup>2</sup>.

Модуль мощностью  $P_w$  в течение выбранного периода выработает следующее количество энергии:

$$W = kEP_w / 1000,$$

где  $E$  – значение инсоляции за выбранный период;  $k$  – коэффициент, равный 0,5 и 0,7 в летний и зимний периоды, соответственно. Он делает поправку на потерю мощно-

сти солнечных элементов при нагреве на солнце, а также учитывает наклонное падение лучей на поверхность модулей в течение дня. Разница в его значении зимой и летом обусловлена меньшим нагревом элементов в зимний период.

Исходя из суммарной мощности потребляемой энергии и приведенной выше формулы, легко рассчитать суммарную мощность модулей, простым делением ее на мощность одного модуля получим количество модулей.

Используя фотоэлектрические модули разной мощности, можно построить солнечную батарею с необходимой нам установленной мощностью. При этом возможны два варианта: либо недостаточная, либо избыточная мощность солнечных батарей. В первом случае солнечная батарея не сможет удовлетворить общую потребность в энергии. Во втором случае у вас будет избыток электроэнергии [3].

**Этап 6. Расчет КПД АСЭ.** Оценка эффективности работы автономной солнечной электростанции определяется коэффициентом полезного действия. КПД АСЭ определяется соотношением

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{сб}}} = \frac{P_{\text{н}} \eta_1 \eta_2}{P_{\text{н}} \eta_2 + P_{\text{зв}}}. \quad (19)$$

**Этап 7. Выбор автономных инверторов напряжения АСЭ.** При выборе инвертора необходимо посчитать всю суммарную нагрузку приборов, подключаемых к инвертору, и увеличить, как минимум, на 30% полученную мощность. Выбранный на эту мощность инвертор позволит запускать такие электроприборы, как компрессорный холодильник, насосы и др., с пусковыми мощностями, в 3-4 раза превышающими паспортный.

В рассматриваемом случае автономный инвертор напряжения последовательно питает электрический чайник и СВЧ-печь через одну розетку. Причем мощность СВЧ-печи больше мощности электрического чайника. Поэтому мощность инвертора составляет 1950 Вт и определяется путем увеличения на 30% мощности СВЧ-печи, пересчитанной на основную шину.

**Выводы.** 1. Разработана методика расчета мощности автономных солнечных электростанций и ее элементов, позволяющая учитывать изменение нагрузки в течение суток.

2. Учет изменения графика нагрузки на интервале ночного времени суток позволяет точно определить требуемую емкость аккумуляторной батареи.

3. Выражение для определения требуемой емкости аккумуляторной батареи автономной солнечной электростанции может быть без труда обобщено для любого числа изменений ступенек графика нагрузки.

4. Разработанная методика расчета мощности автономных солнечных электростанций позволяет исключить неоправданное завышение мощности элементов электростанции и удорожание автономной солнечной электростанции.

#### Литература

1. Аронова Е.С., Охоткин Г.П., Теруков Е.И., Шварц М.З. Особенности работы тонкопленочных солнечных модулей на основе кремния в составе электростанции на широте г. Чебоксары // 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., Серебрянников А.В. Основные принципы построения автономных солнечных электростанций [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/106-7345> (дата обращения: 09.11.2012).

3. Солнечная инсоляция – справочные таблицы [Электронный ресурс]. // Альтернативная энергетика: сайт URL: <http://alternativenergy.ru/solnechnaya-energetika/312-solnechnaya-insolyaciya.html> (дата обращения: 27.10.2012).

---

**ОХОТКИН ГРИГОРИЙ ПЕТРОВИЧ** – доктор технических наук, профессор, декан факультета радиотехники и электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([elius@list.ru](mailto:elius@list.ru)).

**OKHOTKIN GRIGORIY PETROVICH** – doctor of technical sciences, professor, dean of Radio Engineering and Electronics Faculty, Chuvash State University, Russia, Cheboksary ([elius@list.ru](mailto:elius@list.ru)).

---