

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

### ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ: ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Д. И. Зализный

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Солнечная энергетика – активно развивающаяся отрасль в Республике Беларусь. По официальной статистике на 2019 г. [1] установленная мощность фотоэлектрических станций в нашей стране составила 154 МВт. Это 1,5 % от общей установленной мощности электростанций (10181 МВт на 2019 г.). Наиболее крупные фотоэлектростанции сооружены в гомельской и могилевской областях.

Структурная схема фотоэлектростанции изображена на рис. 1.

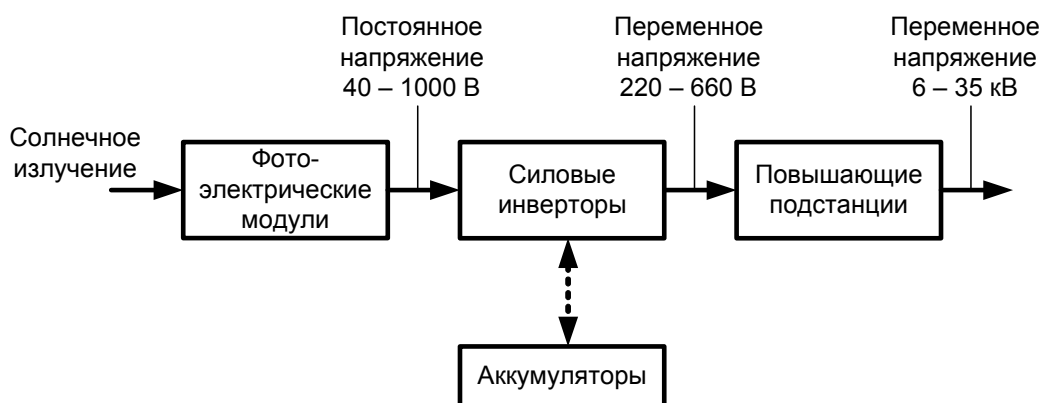


Рис. 1. Структурная схема фотоэлектростанции

Источником энергии для фотоэлектростанции является солнечное излучение (радиация, инсоляция), уровень которого измеряется в Ваттах на метр квадратный ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ). На широте экватора максимальное значение этой величины может достигнуть  $1300 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , а на широте Республики Беларусь – не более  $1100 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Основными элементами фотоэлектростанции являются фотоэлектрические модули (солнечные батареи). Они состоят из отдельных ячеек – фотоэлементов (рис. 2, а).

Внутри каждого фотоэлемента реализован  $p$ - $n$  переход между двумя полупроводниками разных типов проводимости. Солнечное излучение, попадая на  $p$ - $n$  переход, придает дополнительную энергию электронам, в результате на электродах фотоэлемента возникает разность потенциалов – фотоЭДС (ЭДС – электродвижущая сила). Значение этой ЭДС, как правило, не превышает 0,7 В.

В состав модуля могут входить от 48 до 90 фотоэлементов. Наиболее распространенные конструкции – 60 или 72 фотоэлемента. Все фотоэлементы модуля  $BL_1 - BL_n$  (рис. 2, б) соединяются последовательно для повышения значения генерируемого напряжения. Это значит, что в модуле с 72 фотоэлементами максимальное выдаваемое напряжение (в режиме холостого хода) составит:  $72 \cdot 0,7 = 50,4 \text{ В}$ .

По отношению к максимально возможной вырабатываемой мощности КПД солнечных фотоэлементов находится в диапазоне от 15 до 20 %.

Кроме фотоэлементов в модуле имеются обходные диоды  $VD_1 - VD_3$  (рис. 2, б), предназначенные для обеспечения работы модуля при его частичном затенении.

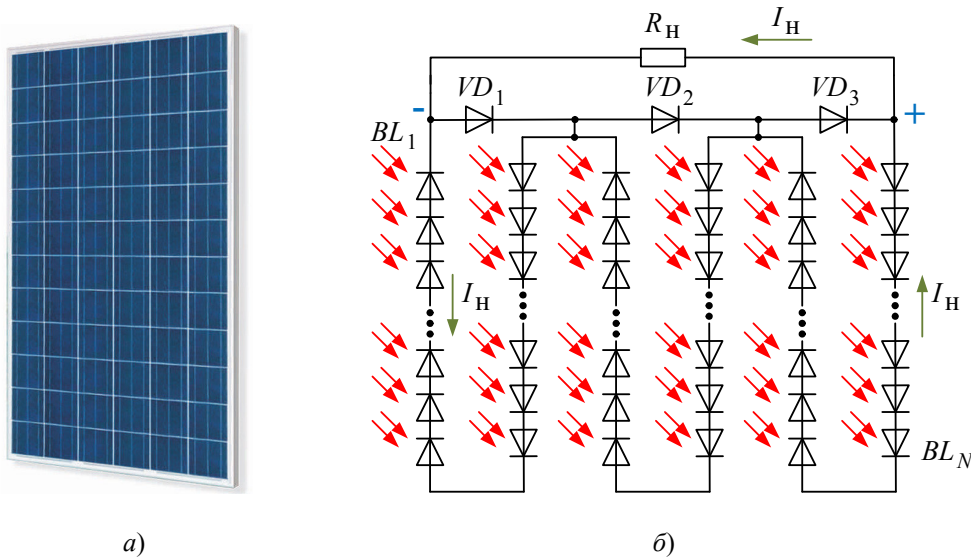


Рис. 2. Фотоэлектрический модуль (а) и его схема (б)

В рамках схемы фотоэлектростанции часть модулей соединяется последовательно в секции, а затем полученные секции подключаются между собой параллельно в блок. Таким образом, на выходе блока формируется постоянное напряжение с максимальным значением не более 1000 В. Далее это напряжение подается на силовой инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный при действующем значении выходного напряжения 220, 380 или 660 В с частотой 50 Гц. По такому принципу устроена вся электростанция: один блок фотоэлектрических модулей – один инвертор.

Выходы силовых инверторов соединяются параллельно и затем подключаются к повышающему трансформатору подстанции, на вторичных обмотках которого формируется трехфазная система напряжений значением 6, 10 или 35 кВ, позволяющая передавать энергию на большие расстояния и выдавать ее в энергосистему страны.

Накопительные аккумуляторы применяются, как правило, на небольших электростанциях мощностью не более 100 кВт. Однако есть реализации таких накопителей и на мощных электростанциях. Так, в Австралии в 2021 г. компанией *Tesla* реализована накопительная станция мощностью 100 МВт.

Для анализа качества работы фотоэлектрических модулей используют их схемы замещения и вольт-амперные характеристики (рис. 3).

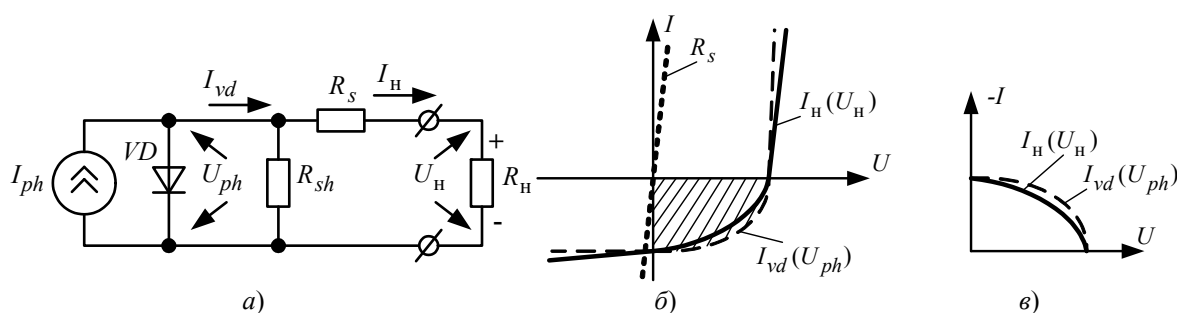


Рис. 3. Схема замещения (а) и вольт-амперные характеристики (б – исходные; в – инверсные для генераторного режима) фотоэлектрического модуля

Полупроводниковая составляющая фотоэлектрического модуля в схеме замещения представлена эквивалентным диодом  $VD$  и источником фототока  $I_{ph}$ . Кроме этого модуль характеризуется параллельным  $R_{sh}$  и последовательным  $R_s$  сопротивлениями.

Если пренебречь влиянием сопротивления  $R_{sh}$ , то вольт-амперная характеристика модуля, показанная зависимостью  $I_H(U_H)$  на рис. 3, б, в, будет равна сумме вольт-амперных характеристик полупроводниковой части  $I_{vd}(U_{ph})$  и сопротивления  $R_s$  (рис. 3, б) по отношению к оси напряжения.

Источник тока  $I_{ph}$  и диод  $VD$  формируют исходную вольт-амперную характеристику как зависимость  $I_{vd}(U_{ph})$  в соответствии с формулой [2], [3]:

$$I_{vd} = I_0 \left( e^{\frac{qU_{ph}}{K_B\theta}} - 1 \right) - K_{ph}S, \quad (1)$$

где  $I_{vd}$  – суммарный ток через  $p-n$  переходы модуля, А;  $I_0$  – обратный ток  $p-n$  переходов при отсутствии солнечного излучения, А;  $q$  – заряд электрона, Кл;  $K_B$  – постоянная Больцмана, Кл · В/К;  $U_{ph}$  – напряжение, генерируемое  $p-n$  переходами модуля, В;  $\theta$  – температура  $p-n$  переходов модуля, К;  $K_{ph}$  – коэффициент пропорциональности;  $S$  – солнечное излучение, Вт/м<sup>2</sup>.

Зависимость  $I_H(U_H)$  можно получить экспериментальным путем. Тогда, вычитая график  $I_{vd}(U_{ph})$ , рассчитанный по формуле (1), из графика  $I_H(U_H)$ , получим график для последовательного сопротивления  $R_s$  (рис. 1, б). На его основе по закону Ома и рассчитывается значение  $R_s$ .

Автором данной статьи с помощью прибора *SOLAR I-Vw* фирмы *HT ITALIA* получены следующие экспериментальные значения последовательного сопротивления [2], [3]: для модуля *Orange Solar OSP XTP 250* (60 фотоэлементов)  $R_s = 0,48$  Ом, а для модуля *SF-P672300* (72 фотоэлемента)  $R_s = 1,22$  Ом.

Если выполнять рассмотренные расчеты последовательного сопротивления фотоэлектрического модуля периодически, то таким образом можно реализовать задачу

его диагностирования, что позволит своевременно выявлять модули с ухудшением характеристик.

#### Литература

1. Энергетический баланс Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – 152 с.
2. Зализный, Д. И. Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета Matlab/Simulink / Д. И. Зализный // Энергетика. Изв. вузов и энергет. об-ний СНГ. – 2019. – № 2. – С. 135–145.
3. Зализный, Д. И. Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета Matlab/Simulink / Д. И. Зализный // Энергетика. Изв. вузов и энергет. об-ний СНГ. – 2020. – № 6. – С. 515–525.