

УДК 621.311.001.57

## **ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ**

**Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, С. Г. ЖУКОВЕЦ**

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

*Рассмотрены основные теоретические сведения по характеристикам фотоэлектрических модулей (ФЭМ), предложены методики графического и аналитического определения последовательного сопротивления ФЭМ. Описана конструкция разработанной авторами новой лабораторной установки для исследования характеристик ФЭМ. Эта установка позволяет проводить соответствующие лабораторные работы при обучении студентов энергетических специальностей, а также выполнять некоторые научные исследования.*

*Приведены результаты экспериментального определения последовательного сопротивления ФЭМ SF-P672300 с помощью разработанной установки. В результате исследований сделаны выводы о том, что последовательное сопротивление ФЭМ зависит как от интенсивности излучения, попадающего на ФЭМ, так и от мощности нагрузки.*

*Практическое применение разработанной установки позволит повысить качество обучения студентов, а также выработать более совершенные методики проектирования фотогенерирующих систем.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрический модуль, фотоэлемент, схема замещения, вольт-амперная характеристика, последовательное сопротивление, лабораторная установка.

## **LABORATORY-SCALE PLANT FOR RESEARCH THE CHARACTERISTICS OF THE PHOTOVOLTAIC MODULE**

**D. I. ZALIZNY, S. G. ZHUKOVETS**

*Educational Institution “Sukhoi State Technical University  
of Gomel”, the Republic of Belarus*

*The main theoretical data are considered on the characteristics of photovoltaic modules (PV module), methods of graphical and analytical determination of the serial resistance of PV module are proposed. The design of the new laboratory-scale plant developed by the authors for research the characteristics of PV module is described. This installation allows for appropriate laboratory work in the training of energy students, as well as some scientific research.*

*Authors present the results of the experimental determination of the sequential resistance of PV module SF-P672300 using the developed installation. As a result of the research, it was concluded that the sequential resistance of the PV module depends both on the intensity of the radiation entering the PV module and on the load power.*

*The practical application of the developed installation will improve the quality of student education, as well as develop better methods for designing photogenerating systems.*

**Keywords:** photovoltaic module, photocell, substitution circuit, voltage-ampere characteristic, serial resistance, laboratory-scale plant.

### **Введение**

Фотоэлектростанции – активно развивающаяся форма источников электроэнергии во всем мире, в том числе и в Республике Беларусь [1]. Проектирование и эксплуатация этих объектов требуют глубоких знаний теории фотогенерирующих уста-

новок, а также навыков их контроля и диагностирования с целью своевременного ремонта и модернизации.

В учебных программах инженерных специальностей энергетического профиля обязательно присутствуют дисциплины, в которых изучаются альтернативные источники энергии. Для проведения лабораторных работ по этим дисциплинам необходимы соответствующие лабораторные установки и методические указания к ним. Очевидно, современный уровень компьютерной техники позволяет реализовать программы-симуляторы, имитирующие работу реальных устройств. Однако все специалисты и преподаватели согласятся, что изучения в виртуальной среде недостаточно. Подготовка квалифицированного инженера в области энергетики подразумевает наличие навыков работы с настоящим оборудованием, умение работать с реальными напряжениями, токами, проводами, измерительными приборами и т. д. В связи с этим актуальна задача создания учебного лабораторного оборудования по изучению принципов работы и характеристик фотогенерирующих устройств.

Целью исследований являлись испытания специальной лабораторной установки «Фотоэлектрический модуль», созданной на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого, и определение последовательного сопротивления фотоэлектрического модуля с помощью этой установки.

#### Характеристики фотоэлектрических модулей, рассматриваемые в научной литературе

Фотоэлектрический модуль (ФЭМ) или солнечная батарея – это устройство, преобразующее энергию солнечного излучения в электроэнергию [2]. Состоят ФЭМ (рис. 1, а) из отдельных фотоэлементов, соединенных последовательно (рис. 1, б) для получения требуемого диапазона изменения выходного напряжения [3].

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 [2]. Значение этой ЭДС, как правило, не превышает 0,65 В.

В состав ФЭМ, применяющихся на фотоэлектростанциях, могут входить от 48 до 90 фотоэлементов, размещенных обычно в шести вертикальных секциях. Наиболее распространенные конструкции – 60 или 72 фотоэлемента.

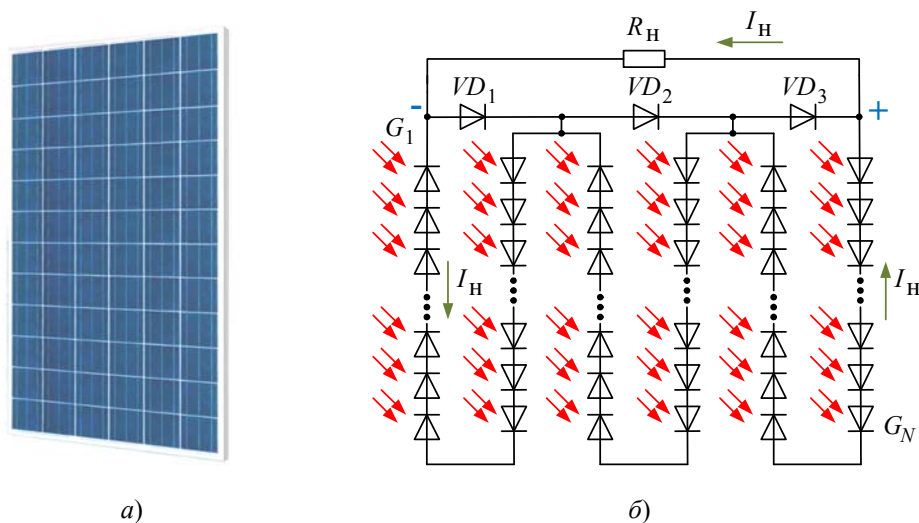


Рис. 1. Фотоэлектрический модуль (а) и его внутренняя схема (б)

Так как все фотоэлементы модуля  $G_1-G_N$  (рис. 1, б) соединяются последовательно, в исправном равномерно освещенном модуле напряжение на нагрузке равно:

$$U_H = U_G \cdot N, \quad (1)$$

где  $U_G$  – напряжение, вырабатываемое одним фотоэлементом;  $N$  – количество фотоэлементов в ФЭМ.

На катоде первого фотоэлемента  $G_1$  формируется отрицательный потенциал, а на аноде последнего фотоэлемента  $G_N$  – положительный потенциал. Ток нагрузки  $I_H$  протекает через обратносмещенные  $p-n$ -переходы фотоэлементов и через сопротивление нагрузки  $R_H$ .

Для анализа качества работы ФЭМ используют схемы замещения их фотоэлементов [2], [4] (рис. 2).

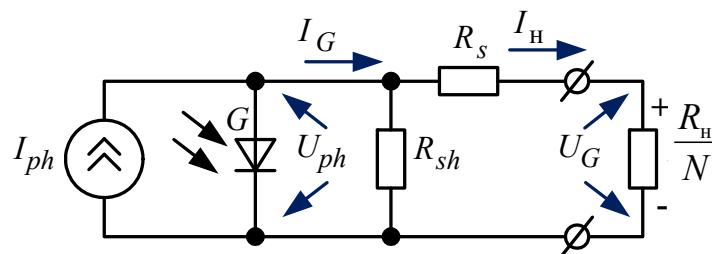


Рис. 2. Схема замещения одного фотоэлемента ФЭМ

Полупроводниковая составляющая фотоэлемента в схеме замещения представлена эквивалентным фотодиодом  $G$  и источником фототока  $I_{ph}$ . Чем выше значение солнечного излучения, тем выше значение тока  $I_{ph}$ .

Фотоэлементы характеризуются также параллельным  $R_{sh}$  и последовательным  $R_s$  сопротивлениями, определяющими эффективность модуля [5]–[8]. Последовательное сопротивление  $R_s$  представляет собой сумму внутреннего сопротивления  $p-n$ -перехода и сопротивлений переходных контактов проводников на поверхности фотоэлемента. Параллельное сопротивление  $R_{sh}$  соответствует сопротивлению изоляции фотоэлемента.

Генерируемый фотоэлементом ток  $I_G$  частично ответвляется на сопротивление  $R_{sh}$  и далее как ток нагрузки  $I_H$  протекает через последовательное сопротивление  $R_s$  и эквивалентное сопротивление нагрузки  $\frac{R_H}{N}$ , где  $R_H$  – сопротивление нагрузки на весь модуль;  $N$  – количество фотоэлементов в ФЭМ.

Несмотря на то, что ток нагрузки  $I_H$  является обратным для  $p-n$ -перехода фотоэлемента, на вольт-амперных характеристиках ФЭМ он рассматривается как положительный (рис. 3).

На рис. 3 изображено семейство расчетных вольт-амперных характеристик ФЭМ SF-P672300 [3] при разных значениях солнечного излучения, но при одной и той же температуре фотоэлементов. На основе этих характеристик можно определить значения напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, а также значения токов и напряжений при различных нагрузках [2], [3].

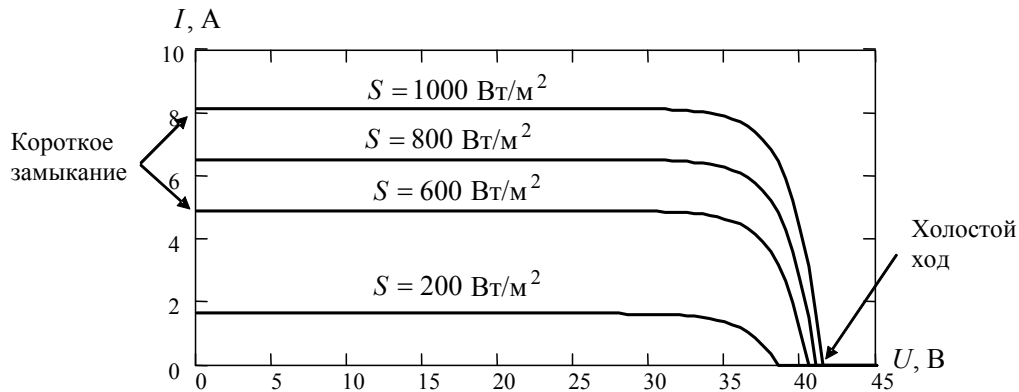


Рис. 3. Семейство вольт-амперных характеристик ФЭМ SF-P672300

На рис. 4 показано семейство расчетных вольт-ваттных характеристик ФЭМ SF-P672300, по которым можно определить значения напряжения  $U_{mp}$  и тока  $I_{mp}$  в точках максимальной отдаваемой мощности [2].

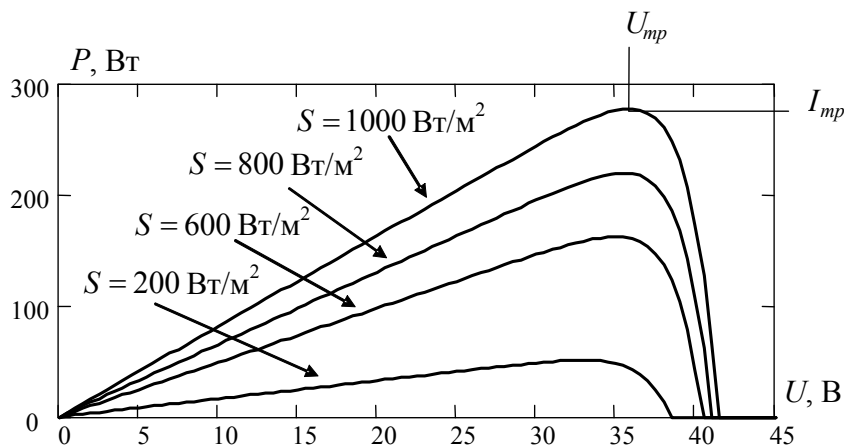


Рис. 4. Семейство вольт-ваттных характеристик ФЭМ SF-P672300

Анализируя экспериментальные вольт-амперные характеристики ФЭМ, можно определить значение последовательного сопротивления  $R_s$ , и соответственно, сделать выводы о степени деградации модуля [3], [7]–[8].

#### Предлагаемый порядок расчета последовательного сопротивления фотоэлектрического модуля

Источник тока  $I_{ph}$  и фотодиод  $G$  в схеме замещения на рис. 2 формируют исходную (теоретическую) вольт-амперную характеристику как зависимость  $I_G(U_{ph})$  в соответствии с формулой, рассматриваемой в источниках [2], [4]:

$$I_G = K_{ph} \cdot S - I_0 \left( e^{\frac{q \cdot U_{ph}}{K_B \cdot (\theta + 273)}} - 1 \right) = K_{ph} \cdot S - I_0 \left( e^{\frac{11594,2 \cdot U_{ph}}{(\theta + 273)}} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $S$  – солнечное излучение, Вт/м<sup>2</sup>;  $K_{ph}$  – коэффициент пропорциональности, А · м<sup>2</sup>/Вт;  $I_0$  – обратный ток  $p$ - $n$ -перехода при отсутствии солнечного излучения, А;

$q$  – заряд электрона, Кл;  $U_{ph}$  – напряжение, генерируемое  $p$ - $n$ -переходом фотоэлемента, В;  $K_B$  – постоянная Больцмана, Кл · В/К;  $\theta$  – температура  $p$ - $n$ -перехода, °С.

Экспериментальные значения параметров в формуле (2) для ФЭМ SF-P672300, полученные в [3]:  $I_0 \approx 1,6 \cdot 10^{-9}$  А;  $K_{ph} \approx 8,1 \cdot 10^{-3}$  А · м<sup>2</sup>/Вт.

Так как значение параллельного сопротивления  $R_{sh}$  для ФЭМ превышает 1 МОм, то его влиянием на эффективность модуля можно пренебречь [3], [7]. Тогда реальная вольт-амперная характеристика фотоэлемента, показанная зависимостью  $I_H(U_G)$  на рис. 5, будет отличаться от расчетной зависимости  $I_G(U_{ph})$  только из-за наличия последовательного сопротивления  $R_s$ .

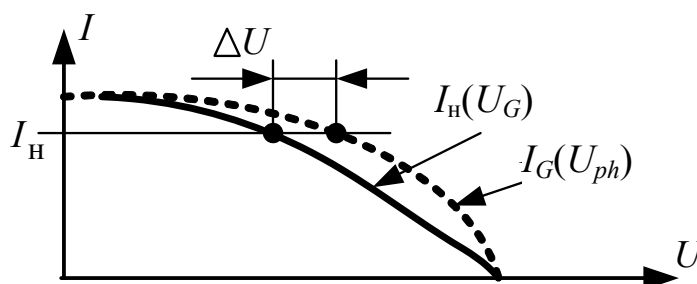


Рис. 5. Графический способ определения значения  $R_s$

При некотором значении тока нагрузки  $I_H$  получим разность напряжений  $\Delta U$ , как показано на рис. 5. Тогда по закону Ома можно рассчитать значение  $R_s$  при данном токе нагрузки:

$$R_s = \frac{|\Delta U|}{I_H}. \quad (3)$$

С учетом того, что все фотоэлементы ФЭМ соединены последовательно, для всего ФЭМ последовательное сопротивление  $R_{s\text{ФЭМ}}$  будет равно:

$$R_{s\text{ФЭМ}} = R_s \cdot N. \quad (4)$$

Из рис. 5 видно, что при разных значениях тока нагрузки  $I_H$  будут получены разные значения сопротивления  $R_{s\text{ФЭМ}}$ . Однако на некотором диапазоне напряжения  $U_G$  эти значения изменятся незначительно. Так, в [3] для модуля ФЭМ SF-P672300 получено приблизительное значение  $R_{s\text{ФЭМ}} \approx 1,2$  Ом.

Очевидно, что графический метод определения значения  $R_s$  неудобен и имеет низкую точность. Его основное преимущество – обеспечение наглядности методики расчета, что облегчает ее восприятие студентами.

Рассмотрим аналитический способ определения значений  $R_s$ . Из рис. 5 следует, что величина  $\Delta U$  – это разность между измеренными  $U_G$  и расчетными  $U_{ph}$  значениями напряжения фотоэлемента при некоторых значениях тока нагрузки  $I_H$ :

$$\Delta U = U_G - U_{ph}. \quad (5)$$

Выразим напряжение  $U_{ph}$  из (2), используя в качестве тока  $I_G$  значения тока  $I_n$ , что справедливо, если пренебрегать параллельным сопротивлением  $R_{sh}$  в схеме замещения на рис. 2. Тогда после логарифмирования получим:

$$U_{ph} = \frac{(\theta + 273) \cdot \ln\left(\frac{K_{ph} \cdot S - I_n}{I_0} + 1\right)}{11594,2}. \quad (6)$$

Таким образом, подставив (5) и (6) в (3), получим требуемое значение  $R_s$ .

### Конструкция разработанной лабораторной установки

На кафедре «Электроснабжение» разработана и собрана лабораторная установка «Фотоэлектрический модуль» для проведения одноименной лабораторной работы.

Лабораторная установка состоит из ФЭМ SF-P672300, светодиодного прожектора (рис. 6, а), и лабораторного стенда (рис. 6, б).



а)



б)

Рис. 6. Внешний вид лабораторной установки:  
а – ФЭМ и прожектор; б – лабораторный стенд

Прожектор предназначен для имитации солнечного излучения и расположен на небольшом расстоянии от одного из фотоэлементов ФЭМ для получения достаточного уровня излучения. От контактов этого фотоэлемента выведены провода в лабораторный стенд, где имеются нагрузочные сопротивления, подключаемые в различных комбинациях восемью тумблерами «Нагрузка». Получаемые значения тока нагрузки измеряются встроенным амперметром, а напряжение, генерируемое фотоэлементом, измеряется милливольтметром.

Конструкция прожектора позволяет включать по отдельности четыре блока его светодиодов, меняя тем самым уровень излучения на поверхности фотоэлемента. Переключения блоков светодиодов производятся четырьмя тумблерами «Излучение», расположенными на лабораторном стенде. Имеется возможность получать значения излучения от 130 до 555 Вт/м<sup>2</sup> (измерено прибором SOLAR I-V HT ITALIA).

К обратной поверхности исследуемого фотоэлемента прикреплен датчик температуры, соединенный с мультиметром, который установлен рядом с лабораторным стендом и показывает значения температуры в градусах Цельсия.

В нижней части лабораторного стенда расположены элементы для изучения работы контроллера зарядки аккумуляторов. При этом аккумуляторная батарея имитируется блоком конденсаторов, размещенным рядом с лабораторным стендом и подключенным к соответствующей паре входов контроллера.

### Экспериментальное определение последовательного сопротивления фотоэлектрического модуля

На основе разработанной лабораторной установки можно проводить научные исследования, относящиеся к различным характеристикам ФЭМ. В качестве примера исследуем зависимость последовательного сопротивления  $R_s$  от интенсивности излучения и тока нагрузки.

Расчет значений  $R_s$  будем выполнять в соответствии с рис. 5 и формулами (1)–(6).

На рис. 7 показаны экспериментальные и расчетные (по формулам (1)–(2)) вольт-амперные характеристики ФЭМ при значениях излучения  $S = 555 \text{ Вт/м}^2$  (рис. 7, а) и  $S = 168 \text{ Вт/м}^2$  (рис. 7, в). Построены соответствующие зависимости  $R_s(U_n)$ , полученные по формулам (3)–(6), при  $S = 555 \text{ Вт/м}^2$  (рис. 7, б) и при  $S = 168 \text{ Вт/м}^2$  (рис. 7, г). Экспериментальные значения температуры учитывались в каждой точке полученных зависимостей. По горизонтальной оси откладывались экспериментальные значения напряжения  $U_G$ , умноженные на количество фотоэлементов в модуле  $N = 72$ .

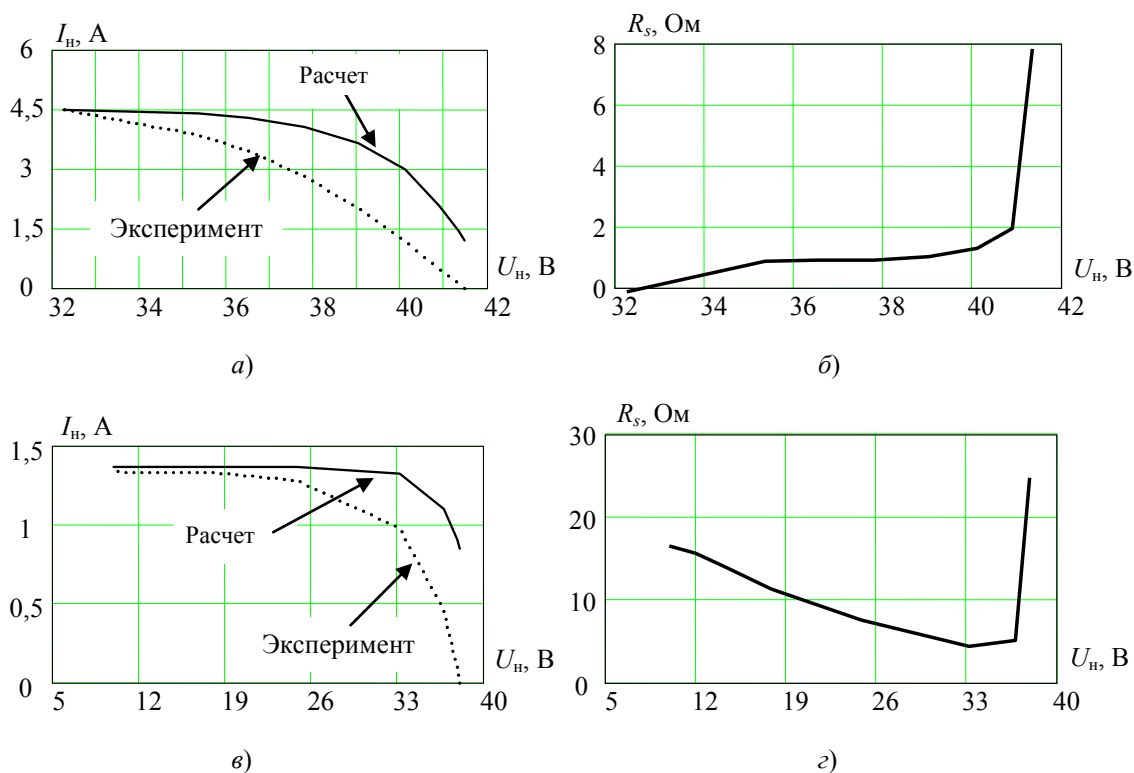


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные зависимости для ФЭМ SF-P672300:  
 а – вольт-амперные характеристики ФЭМ при  $S = 555 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\theta = 38\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 б – зависимость  $R_s(U_n)$  при  $S = 555 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\theta = 38\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 в – вольт-амперные характеристики ФЭМ при  $S = 168 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\theta = 37\text{--}39 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 г – зависимость  $R_s(U_n)$  при  $S = 168 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\theta = 37\text{--}39 \text{ }^\circ\text{C}$

В процессе измерений не удалось приблизить значения напряжения  $U_G$  к нулю даже при коротком замыкании на нагрузку. Это связано с влиянием сопротивлений проводов, амперметра и сопротивления  $R_s$ , а также с малыми значениями напряжения  $U_G$  (не выше 0,6 В).

Из зависимостей  $R_s(U_n)$  следует, что при излучении  $S = 555 \text{ Вт/м}^2$  на графике имеется горизонтальный участок, свидетельствующий о приблизительно неизменном значении сопротивления  $R_s$ , равном примерно 1 Ом. Подобный горизонтальный участок наблюдался и для  $S = 355 \text{ Вт/м}^2$  (см. таблицу). Поведение этих зависимостей в целом соответствует рис. 6. Однако при излучении  $S = 168 \text{ Вт/м}^2$  значение  $R_s$  существенно изменяется в диапазоне от 5 до 16 Ом.

Для более подробного анализа в таблице приведены измеренные с помощью лабораторного стенда значения напряжения, тока, температуры, а также расчетные значения сопротивления  $R_s$ .

**Экспериментальные и расчетные значения, полученные  
с помощью лабораторной установки**

$S = 555 \text{ Вт/м}^2$									
$U_G, \text{ В}$	0,576	0,574	0,568	0,557	0,542	0,525	0,507	0,491	0,448
$I, \text{ А}$	0	0,09	0,49	1,18	2,01	2,81	3,44	3,84	4,5
$\theta, \text{ }^\circ\text{С}$	38	38	38	39	39	39	40	40	40
$R_s, \text{ Ом}$	–	7,82	1,94	1,28	1,02	0,897	0,887	0,86	0,153
$S = 355 \text{ Вт/м}^2$									
$U_G, \text{ В}$	0,549	0,547	0,539	0,524	0,496	0,446	0,393	0,352	0,295
$I, \text{ А}$	0	0,08	0,48	1,12	1,85	2,39	2,67	2,79	2,85
$\theta, \text{ }^\circ\text{С}$	41	41	41	41	40	40	40	40	40
$R_s, \text{ Ом}$	–	27,08	5,09	2,61	2,04	2,49	3,06	3,44	4,18
$S = 168 \text{ Вт/м}^2$									
$U_G, \text{ В}$	0,528	0,525	0,510	0,461	0,345	0,247	0,196	0,166	0,138
$I, \text{ А}$	0	0,08	0,46	0,98	1,28	1,33	1,33	1,33	1,34
$\theta, \text{ }^\circ\text{С}$	39	39	39	39	39	38	38	38	39
$R_s, \text{ Ом}$	–	24,67	5,18	4,34	7,6	11,3	14,07	15,69	16,55

Таким образом, из результатов исследований следует, что последовательное сопротивление ФЭМ  $R_s$  является нелинейным и зависит как от мощности нагрузки, так и от интенсивности излучения. Особенно сильно нелинейность сопротивления  $R_s$  проявляется при излучении менее  $200 \text{ Вт/м}^2$ . Однако, определив зависимости  $R_s$  для различных режимов ФЭМ, в процессе эксплуатации этих ФЭМ на реальных фотоэлектростанциях можно анализировать значения  $R_s$  на предмет их непрерывного роста, что будет свидетельствовать о постепенном снижении эффективности ФЭМ.

**Экспериментальные исследования вольт-ваттных характеристик фотоэлектрического модуля**

На рис. 8 представлены расчетные (аналогично рис. 4) и экспериментальные зависимости мощности нагрузки от тока нагрузки, пересчитанные с одного фотоэлемента на весь ФЭМ в соответствии с формулой (1) при  $S = 555 \text{ Вт/м}^2$  (рис. 8, а) и  $S = 168 \text{ Вт/м}^2$  (рис. 8, б).

Как видно из рис. 8, расчетные и соответствующие им экспериментальные кривые имеют максимумы при различных значениях напряжения на нагрузке, т. е. значения  $U_{mp}$  и  $I_{mp}$  в точках максимальной отдаваемой мощности (рис. 4) также будут различными. Основная причина данной ситуации – влияние сопротивления  $R_s$ .



Это значит, что при расчете оптимальной нагрузки ФЭМ в реальных условиях эксплуатации нужно учитывать значения  $R_s$ , которые, как было сказано выше, зависят от интенсивности излучения, тока нагрузки, температуры ФЭМ и других факторов.

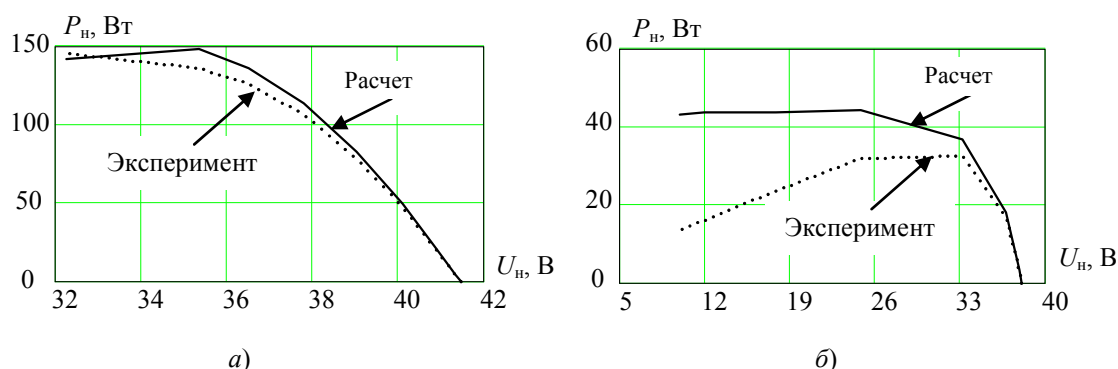


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные вольт-ваттные характеристики для ФЭМ SF-P672300:  
 а – при  $S = 555 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\theta = 38\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б – при  $S = 168 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\theta = 37\text{--}39 \text{ }^\circ\text{C}$

### Заключение

В результате проделанной работы сформулированы следующие выводы:

1. Последовательное сопротивление, влияющее на эффективность ФЭМ, можно определить как графическим, так и аналитическим способами.
2. Разработанная лабораторная установка позволяет исследовать вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики, а также рассчитывать значения последовательного сопротивления реальных ФЭМ без их размещения на открытом солнце.
3. На основе разработанной лабораторной установки получены значения последовательного сопротивления ФЭМ SF-P672300 в диапазоне от 0,15 Ом до 24,7 Ом, что свидетельствует о нелинейном характере этого сопротивления.
4. Разработанная лабораторная установка может использоваться и для учебного процесса, и для научных исследований.

### Литература

1. Энергетический баланс Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2020. – 152 с.
2. Foster, R. Solar Energy: Renewable Energy and the Environment / R. Foster, M. Ghassemi, Alma Cota. – Boca Raton : CRC Press : Taylor & Francis Group, 2010. – 382 p.
3. Зализный, Д. И. Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink / Д. И. Зализный // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2020. – Т. 63, № 6. – С. 513–523.
4. Зализный, Д. И. Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink / Д. И. Зализный // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 135–145.
5. Зализный, Д. И. Контроль эффективности фотоэлектрических модулей / Д. И. Зализный // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2021. – № 12. – С. 23–29.
6. Elzein, I. An Adaptive Maximum Power Output Sustaining System for a Photovoltaic Power Plant Based on a Robust Predictive Control Approach / I. Elzein, Yu. N. Petrenko // Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. – 2020. – № 63 (5). – P. 441–449.

7. Pan, L. Analysis of Photovoltaic Module Resistance Characteristics / L. Pan // International Journal of Engineering. – 2013. – Vol. 26, № 11. – P. 1369–1376.
8. Benghanem, M. S. Modeling of photovoltaic module and experimental determination of serial resistance / M. S. Benghanem, S. N. Alamri // Journal of Taibah University for Science. – 2010. – Vol. 2, № 1. – P. 94–105.

*Получено 29.04.2022 г.*