

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 620.91: 620.92: 004.9

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-4-49-6-14

Л. Х. Зайнутдинова¹, В. Г. Ильичев²

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

¹ ООО НПП «Астраэнергоэффект»

² Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева

Lzain@mail.ru, vova201428@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Лариса Хасановна Зайнутдинова, Lzain@mail.ru

Предложена модель фотоэлектрического модуля (ФЭМ) как источника тока с потерями, поскольку в современных ФЭМ ток приемника мало изменяется в пределах изменения напряжения от нуля до точки максимальной мощности. Предложено использовать схему замещения ФЭМ в виде параллельного соединения идеального источника светового тока и резистивного элемента, учитывающего электрические потери и характеризующего внутренней проводимостью G_{BT} . Проведен анализ электрических потерь с применением предложенной схемы замещения на примере фотоэлектрического модуля «Pramac 125». Показана нелинейная зависимость мощности потерь от выходного напряжения. В точке максимальной мощности электрические потери составляют порядка (17–27) % от мощности нагрузки в зависимости от освещенности. В режиме холостого хода электрические потери ФЭМ максимальны. Показана нелинейная зависимость внутренней проводимости G_{BT} от выходного напряжения. Наибольшие значения G_{BT} имеют место в режиме холостого хода. Предложенная методика оценки электрических потерь может быть использована при массовом контроле изготавливаемых солнечных элементов. В качестве параметра, характеризующего потери, и, соответственно, качество изготовленного ФЭМ, рекомендуется рассматривать G_{BTMM} – внутреннюю проводимость в точке максимальной мощности.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, коэффициент полезного действия, электрические потери, источник тока, внутренняя проводимость

L. Kh. Zaynutdinova¹, V. G. Ilychev²

ANALYSIS OF ELECTRICAL LOSSES OF THE PHOTOVOLTAIC MODULE BASED ON THE MODEL OF THE REAL CURRENT SOURCE

¹ LLC «Astraenergoeffect»

² Astrakhan State University named after V. N. Tatischev

The model of the photovoltaic module (PEM) as a source of current with losses is proposed, since in modern PEM the receiver current changes little within the voltage change from zero to the point of maximum power. It is proposed to use the scheme of substitution of PEM in the form of a parallel compound of an ideal light current source and a resistive element, internal losses and characterized by internal conductivity G . Analysis carried out of electrical losses of the proposed substitution scheme on the example of a photovoltaic module «Pramac 125». Nonlinear dependence of loss power on output voltage is shown. At the point of maximum power, electrical losses are on the order of (17–27) % of the load power, depending on the illumination. In idle mode, the electrical losses of the PEM are maximum. Nonlinear dependence of internal conductivity is shown from the output voltage. The greatest importance are in idling mode. The proposed method for estimating electrical losses can be used in Mass control of manufactured solar cells. As a parameter, characterized loss, and, respectively, quality and made by FEM, – internal conductivity at the maximum power point.

Keywords: photoelectric module, utility factor, electrical losses, current source, internal conductivity

Введение

Солнечная энергия является одним из важнейших видов возобновляемых источников энергии. Наиболее распространенной технологией является использование фотоэлектрических систем, преобразующих солнечный свет в полезную электрическую энергию. Фотоэлектрические системы просты в монтаже и обслуживании, их эксплуатация не ухудшает состояние окружающей среды. Основным недостатком фотоэлектрической технологии является нестабильность выработки электроэнергии, связанная с переменчивостью солнечной инсоляции и других метеорологических факторов (град, снег, пыль, ветер, температура и влажность окружающей среды). Другим недостатком является то, что солнечные элементы имеют ограниченный коэффициент полезного действия (КПД). Только часть полученной солнечной энергии преобразуется в полезную электрическую энергию, отдаваемую приемнику, остальная энергия при этом преобразуется в тепло. В целом ряде работ [1], [2], [3], [4] выделяется снижение коэффициента полезного действия (КПД) солнечных элементов с ростом температуры.

В работе [5] приведены обобщенные сведения о КПД разных видов солнечных батарей. КПД монокристаллических кремниевых батарей достигает 22 %, поликристаллических – 18 %. КПД батарей на основе арсенида галлия достигает (35–40) %. Показана перспективность использования солнечных батарей на основе перовскита. Отмечено, что самыми популярными солнечными батареями на рынке на сегодняшний день являются батареи на основе кремния.

В работе [6] приведены следующие значения КПД для кремниевых солнечных батарей: Si (монокристаллический) – 24,7 %, Si (поликристаллический) – 20,3 %, Si (тонкопленочная передача) – 16,6 %, Si (тонкопленочный субмодуль) – 10 %.

В работе [5, стр. 37] также говорится об изменении КПД солнечных панелей на продолжительном интервале времени, то есть о деградации солнечных панелей. В среднем за 20–25 лет солнечная панель теряет около (15–20) % от своей первоначально заявленной мощности. В работе [7] исследована деградация монокристаллического модуля TCM210SB Telecom-STV за период с 2014 по 2019 годы в условиях Аст-

раханской области. Оценено снижение выработки с учетом коэффициента инсоляции, деградация составила 2 %. В работе [8] исследована зависимость характеристик ФЭМ от температуры в реальных условиях эксплуатации в регионах с высокими температурами окружающей среды. Это исследование проводилось с применением информационно-измерительной системы долгосрочного мониторинга характеристик ФЭМ [9].

К настоящему времени в практической фотовольтаике уже накоплена определенная база экспериментальных данных об изменениях КПД фотоэлектрических модулей в зависимости от интенсивности солнечной инсоляции и других метеорологических факторов (град, снег, пыль, ветер, температура и влажность окружающей среды). Дальнейшее решение проблемы повышения КПД невозможно без анализа потерь энергии ФЭМ. При этом в практической фотовольтаике пока еще не уделено должного внимания данному вопросу. Целью настоящего исследования является анализ потерь мощности ФЭМ при их эксплуатации. Такой анализ целесообразно провести с привлечением эквивалентных схем ФЭМ.

1. Эквивалентные схемы фотоэлектрических модулей

Основным показателем энергоэффективности любого устройства является КПД. Согласно [10, стр. 4] в 1953 году считалось, что максимальный КПД солнечных фотоэлементов не может быть более 0,6 %. Но уже в 1955 году была изготовлена солнечная батарея, КПД отдельных элементов которой достигал 10 %. Теоретический КПД кремниевого фотоэлемента для солнечного спектра должен быть приблизительно (22–23) % [10, стр. 35]. Выделены световые потери и потери энергии электронов и дырок при движении их внутри преобразователя. Световые потери возникают из-за: 1) отражения падающего излучения от поверхности преобразователя, 2) частичного поглощения фотонов без образования пары электрон–дырка, 3) прохождения некоторого количества фотонов до заднего (тыльного) электрода и поглощения в нем.

Потери энергии электронов и дырок при движении их внутри преобразователя имеют сложную физическую природу. Эти потери отражены в эквивалентной схеме, приведенной на рис. 1.

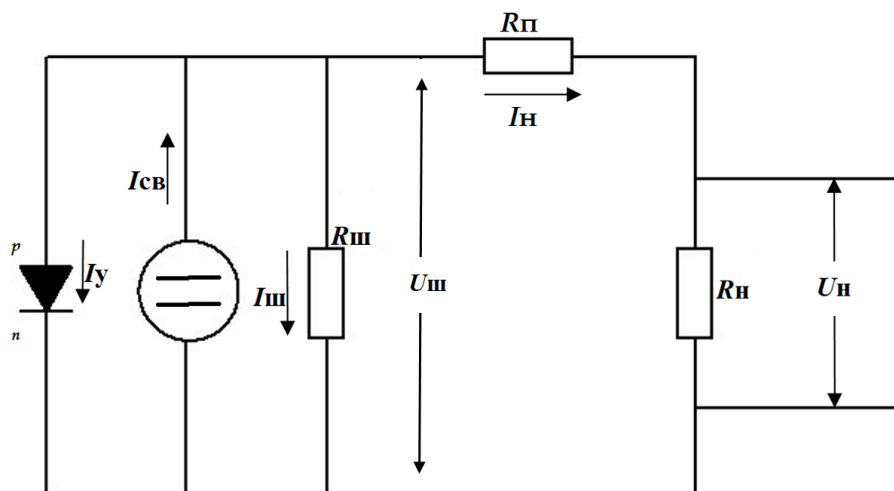


Рис. 1. Эквивалентная схема фотоэлектрического преобразователя по [10, стр. 29]

В работе [10, стр. 30] выделены сопротивления двух видов: 1) последовательное $R_{п}$, куда входит сопротивление контактов и сопротивление самого полупроводникового материала, из которого изготовлен фотопреобразователь; 2) параллельное или шунтирующее сопротивление $R_{ш}$, которое образуется за счет наличия обратного сопротивления «р-п» перехода и различных проводящих пленок и загрязнений, шунтирующих «р» и «п» области. Согласно рис. 1:

$$I_{св} = I_y + I_{ш} + I_{н},$$

где $I_{св}$ – ток, генерируемый преобразователем под действием света; I_y – обратный ток через «р-п» переход; $I_{ш}$ – ток через шунтирующее «р-п» переход сопротивление; $I_{н}$ – ток внешней цепи (ток нагрузки); $R_{н}$ – сопротивление нагрузки.

Сопротивление $R_{п}$ приводит к потере выходного напряжения, а сопротивление $R_{ш}$ – к потере тока нагрузки.

В работе [11] предельное значение КПД солнечного элемента определено на уровне 30 %. Эквивалентная схема солнечного элемента [11, стр. 128] подобна схеме рис. 1 и имеет вид цепи с сосредоточенными сопротивлениями: последовательным R_s и параллельным (шунтирующим) R_p . В любом реальном солнечном элементе существуют потери мощности, поскольку R_s больше 0, а R_p меньше бесконечности. Во многих случаях введение сосредоточенных сопротивлений R_s и R_p позволяет описать вольтамперную характеристику солнечного элемента. В работе [11, стр. 129] дается оценка влияния последовательного и шунтирующего сопротивлений на величину потерь мощности.

При проектировании солнечных элементов рекомендуемое допустимое значение потерь на этих сопротивлениях составляет порядка 3 %.

В работе [12] приведено наиболее развернутое описание потерь в солнечных элементах. Выделены [12, стр. 50] следующие виды потерь: оптические потери; рекомбинационные потери фотогенерированных электронно-дырочных пар до их разделения переходом; омические потери (обусловлены протеканием в объеме «р» и «п» области фотогенерированных носителей тока, а также основных носителей тока). Омические потери характерны для любого источника электроэнергии. Радикальное снижение омических потерь особенно актуально для солнечных элементов с преобразованием концентрированного солнечного излучения. В специальной научной литературе нет единой общепринятой методики описания и измерения омических потерь в солнечных элементах [12, стр. 59].

Различные компоненты внутреннего сопротивления солнечного элемента могут быть рассчитаны исходя из определяемых по тестовым образцам удельных параметров [12, стр. 78] либо измерены (часто приближенно) на готовых солнечных элементах. Общим недостатком этих методик является низкая разрешающая способность и невозможность проводить массовый контроль изготавливаемых солнечных элементов [12, стр. 90].

2. Модель фотоэлектрического модуля как источника тока с потерями

Фотоэлектрический преобразователь по отношению к приемнику электрической энергии выполняет роль источника электрической энергии. Согласно теоретическим основам электро-

техники [13, стр. 147–148] источники энергии в электрических цепях принято рассматривать либо как источники ЭДС, либо как источники тока. Для источников ЭДС характерно сравнительно малое изменение выходного напряжения

при изменении тока от нуля до номинального значения. Для реальных источников тока характерно практическое постоянство тока при изменениях сопротивления нагрузки и, соответственно, выходного напряжения (рис. 2).

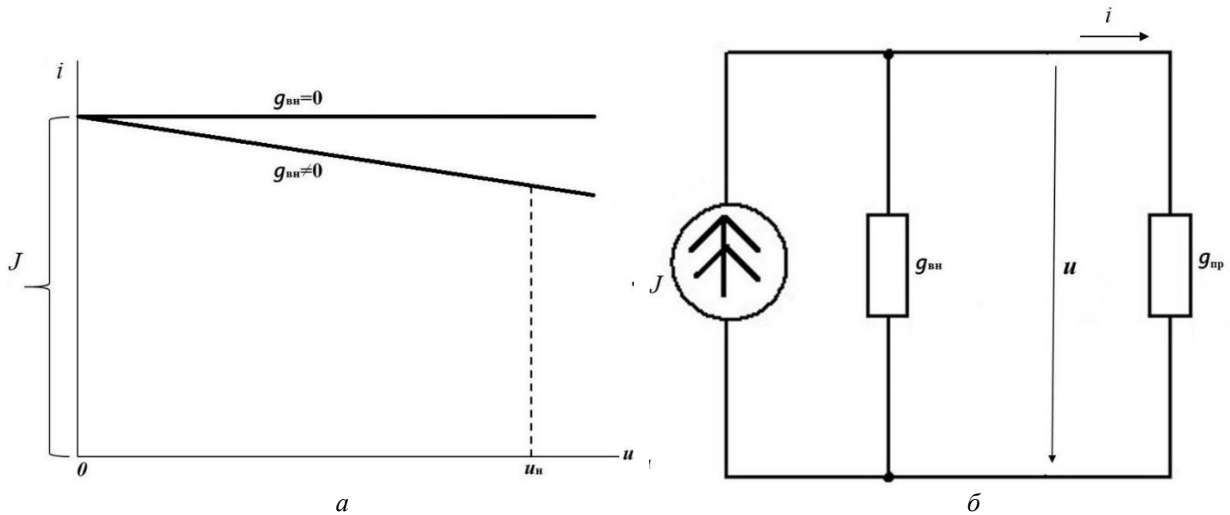


Рис. 2. Внешняя характеристика (а) и схема замещения источника тока (б) [13]

Совершенствование технологий проектирования и производства солнечных элементов привело к тому, что современные фотоэлектрические преобразователи имеют вольт-амперные характеристики, близкие к виду внешней характеристики реального источника тока. Покажем это на конкретном примере.

Рассмотрим современные ФЭМ, собранные из кремниевых гетероструктурных (НЖТ) солнечных ячеек. Солнечные панели изготовлены из НЖТ-ячеек толщиной 130 мкм, соединенных между собой по технологии контактирования SmartWire, которая уменьшает потери мощно-

сти из-за возникновения возможных дефектов, например, трещин. ФЭМ имеет следующие электрические параметры [14]:

I_{sc} – 9,08 А, ток короткого замыкания,

U_{oc} – 14,72 В, напряжение холостого хода,

I_{mpp} – 8,58 А, сила тока в точке максимальной мощности,

U_{mpp} – 12,21 В, напряжение в точке максимальной мощности,

P_{mpp} – 104,7 Вт, максимальная мощность,

FF – 78,36 %, коэффициент заполнения.

Вольт-амперная характеристика ФЭМ приведена на рис. 3:

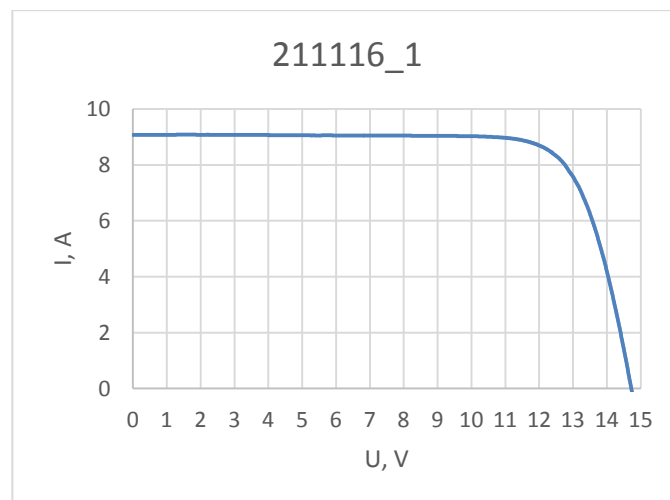


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика фотоэлектрических модулей, собранных из кремниевых гетероструктурных (НЖТ) солнечных ячеек

Как видно из рис. 3, ток, поступающий в приемник, мало изменяется в пределах изменения напряжения от нуля до номинального значения (до точки максимальной мощности), что обусловлено повышением уровня современного производства солнечных элементов. Соответственно, рассмотренный ФЭМ с точки зрения теоретических основ электротехники можно отнести к категории реального источника тока. В настоящей работе предлагается более простая (по сравнению со схемой рис. 1) схема замещения ФЭМ. Предлагаемая авторами новая упрощенная схема замещения будет достаточной для анализа потерь мощности ФЭМ при их эксплуатации. Новая упрощенная схема заме

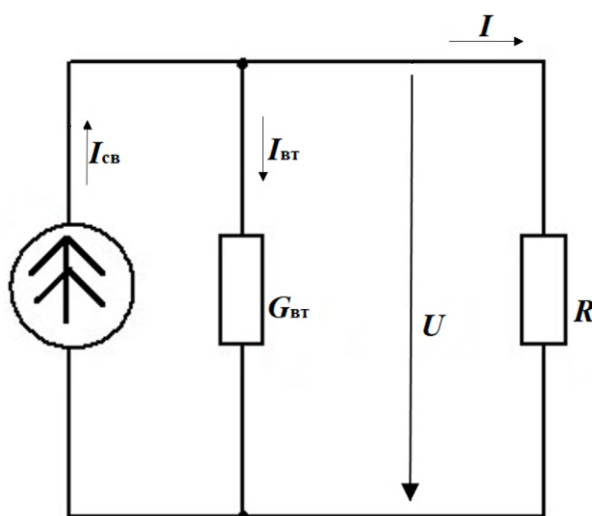


Рис. 4. Эквивалентная схема ФЭМ как реального источника тока с внутренней проводимостью $G_{вт}$

щения ФЭМ (рис. 4) представляет собой параллельное соединение идеального источника светового тока и резистивного элемента, учитывающего внутренние потери и характеризующего внутреннюю проводимость $G_{вт}$.

На рис. 4 приняты следующие обозначения:

$I_{св}$ – ток, генерируемый под действием света,

$I_{вт}$ – ток, учитывающий потери,

I – ток нагрузки,

U – выходное напряжение (напряжение нагрузки),

$G_{вт}$ – внутренняя проводимость,

R – сопротивление нагрузки.

Предложенная эквивалентная схема ФЭМ учитывает в комплексе рекомбинационные и омические потери. Назовем этот комплекс электрическими потерями.

Для эквивалентной схемы ФЭМ, приведенной на рис. 4, будут справедливы следующие соотношения:

$P = U \cdot I$ – мощность приемника (нагрузки),

$I_{св} = I_{кз}$,

$I_{вт} = I_{кз} - I$,

$\Delta P = U \cdot I_{вт}$ – мощность электрических потерь,

$G_{вт} = I_{вт} / U$ – внутренняя проводимость.

3. Анализ электрических потерь фотоэлектрического модуля на основе модели реального источника тока

Проведем анализ электрических потерь на примере фотоэлектрического модуля «Pramac 125», вольт-амперные характеристики которого приведены на рис. 5.

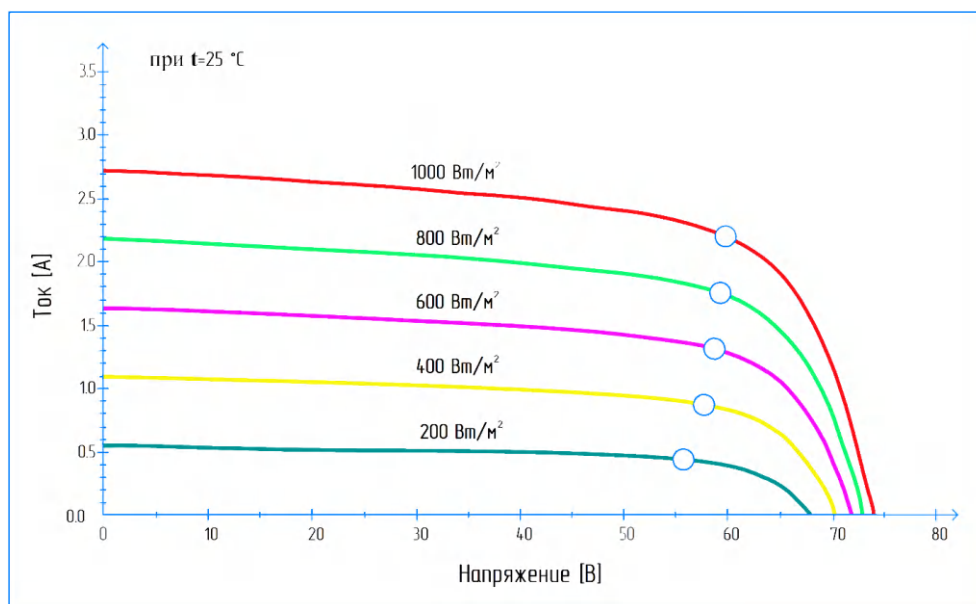


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при температуре окружающей среды $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, инсоляциях $I_n = 1000\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 800\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 600\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 400\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 200\text{ Вт/м}^2$

Рассмотрим вольт-амперную характеристику фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при температуре окружающей среды $t = 25^\circ\text{C}$ и инсоляции $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ($I_{кз} = 2,72 \text{ А}$). Проведем вычисления потерь мощности, мощности нагрузки и значений внутренней проводимости в диапазоне изменения сопротивления нагрузки

от бесконечности (холостой ход) до нуля (короткое замыкание):

$$\Delta P = (I_{кз} - I) \cdot U$$

$$P = U \cdot I$$

$$G_{вт} = (I_{кз} - I)/U$$

Результаты приведены в таблице и отображены на рис. 6.

**Потери и внутренняя проводимость ФЭМ «Pramac 125»
при температуре окружающей среды $t = 25^\circ\text{C}$ и инсоляции $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$**

№ п/п	U, В	I, А	P, Вт	R, Ом	($I_{кз}-I$), А	ΔP , Вт	Потери в % $\Delta P/P$	Gвт, (мСм)	Прим.
1	74	0	0	-	2,72	292		36,82	Х. х.
2	70	1,25	87,5	56	1,47	102,9		21	
3	65	1,9	123,5	34,211	0,82	53,3		12,615	
4	60	2,2	132	27,273	0,52	31,2	23,63636364	8,67	Тмм
5	50	2,4609	123,05	20,318	0,2591	12,955		5,182	
6	40	2,538	101,52	15,76	0,182	7,28		4,55	
7	30	2,586	77,58	11,601	0,134	4,02		4,467	
8	20	2,636	52,72	7,5873	0,084	1,68		4,2	
9	10	2,686	26,86	3,723	0,034	0,34		3,4	
10	0	2,72	0	0	0	0			К. з.

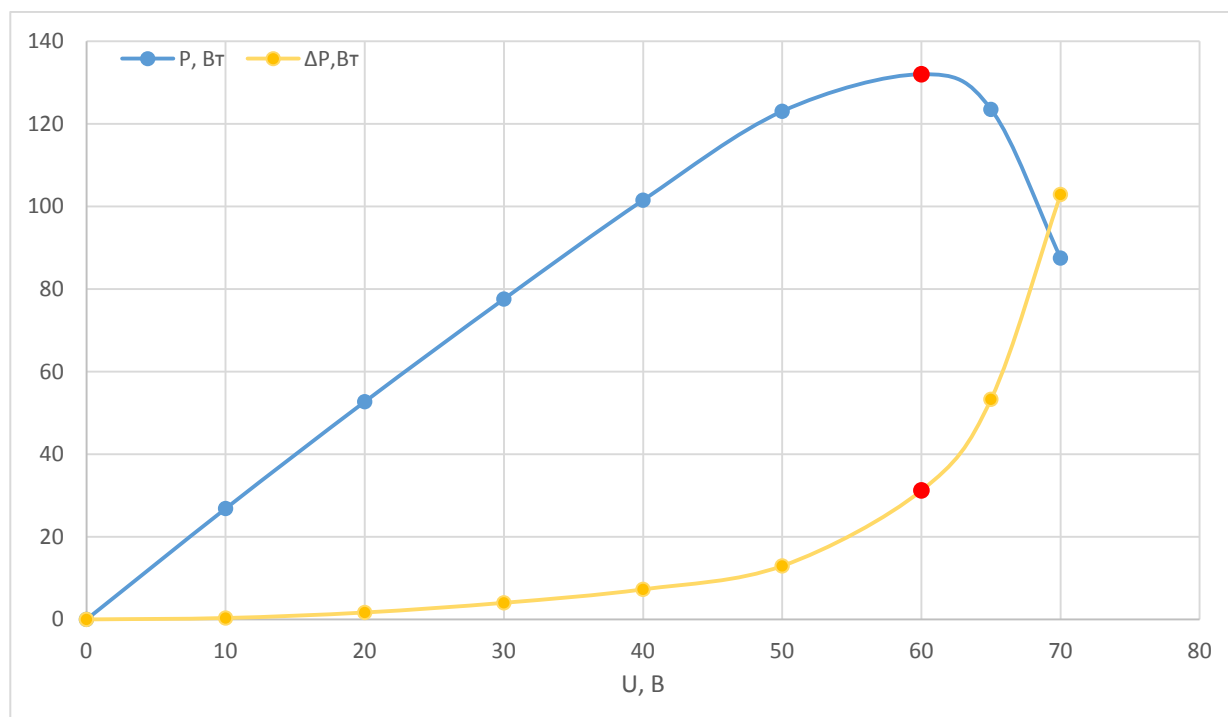


Рис. 6. Зависимость мощности нагрузки P (синяя), зависимость потерь мощности ΔP (желтая) от напряжения для фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при температуре окружающей среды $t = 25^\circ\text{C}$ и инсоляции $I_n = 1000 \text{ Вт/м}^2$

Красным обозначены точки максимальной мощности (Тмм). В точке максимальной мощности при инсоляции 1000 Вт/м^2 электрические потери составляют 26,636 % по отношению к

мощности нагрузки. Имеет место нелинейная зависимость электрических потерь от выходного напряжения.

Аналогично рассмотрим вольт-амперные ха-

рактеристики фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при температуре окружающей среды $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ряде значений инсоляции 800 Вт/м^2 , 600 Вт/м^2 , 400 Вт/м^2 , 200 Вт/м^2 . Графики зависимости мощности нагрузки и мощности потерь от выходного напряжения подобны рис. 6, имеются лишь количественные отличия. В точке максимальной мощности электрические потери составляют по отношению к мощности нагрузки:

23,033 % при инсоляции 800 Вт/м^2 ,
20,74 % при инсоляции 600 Вт/м^2 ,
20,218 % при инсоляции 400 Вт/м^2 ,
17,02 % при инсоляции 200 Вт/м^2 .

Зависимости внутренней проводимости $G_{вт}$ (мСм) от напряжения фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при инсоляции $I_n = 1000\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 800\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 600\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 400\text{ Вт/м}^2$, $I_n = 200\text{ Вт/м}^2$, построенные по результатам проведенного анализа, приведены на рис. 7.

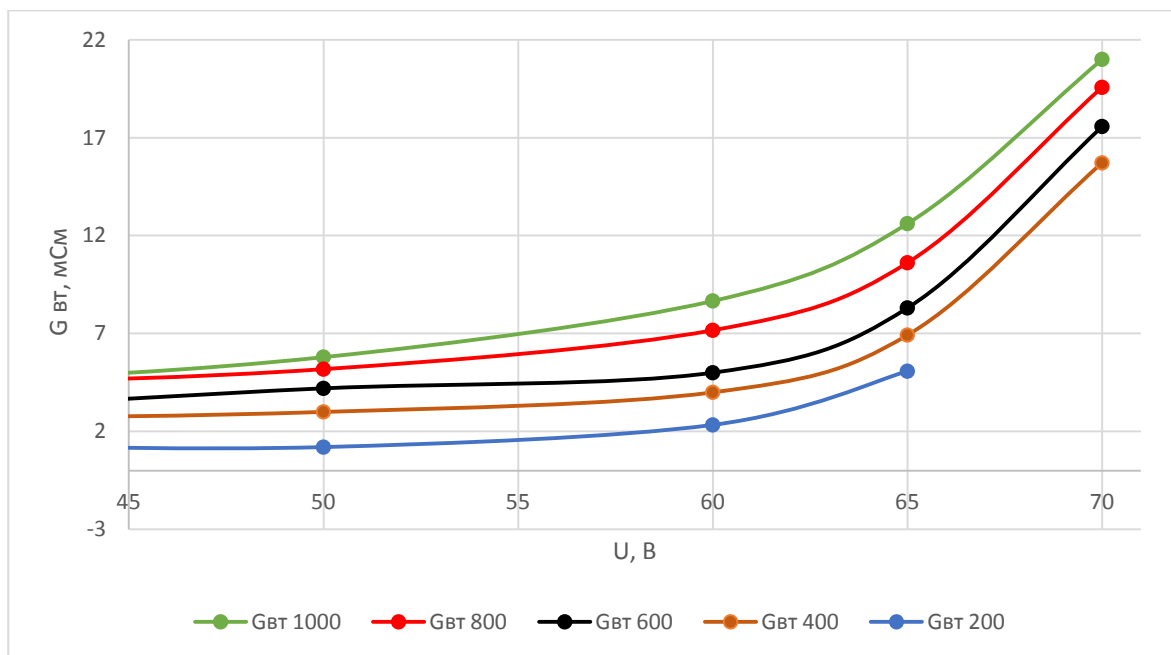


Рис. 7. Зависимость внутренней проводимости $G_{вт}$ (мСм) от напряжения U фотоэлектрического модуля «Pramac 125» при инсоляции $I_n = 1000\text{ Вт/м}^2$ (зеленый), $I_n = 800\text{ Вт/м}^2$ (красный), $I_n = 600\text{ Вт/м}^2$ (черный), $I_n = 400\text{ Вт/м}^2$ (коричневый), $I_n = 200\text{ Вт/м}^2$ (синий)

В случае холостого хода, когда цепь разомкнута, приемник отключен, вся энергия, полученная от солнца, остается внутри самого фотоэлектрического модуля и таким образом превращается в потери. Обнаруживается парадоксальное свойство фотоэлектрического источника электрической энергии, а именно: в режиме холостого хода электрические потери ФЭМ максимальны. В других видах источников электрической энергии, например, в электромеханических генераторах, потери холостого хода обычно меньше потерь в нагрузочных режимах.

На практике при сборке схем из солнечных панелей возникает необходимость организации входного контроля ФЭМ. В работе [15] было показано, что из 100 экземпляров оказались непригодными для последовательного соединения в солнечной панели из-за существен-

ного разброса параметров 24 экземпляра ФЭМ.

Предложенная в настоящем исследовании модель ФЭМ как реального источника тока с внутренней проводимостью $G_{вт}$ позволяет сравнительно легко определять и оценивать электрические потери ФЭМ. В качестве параметра, характеризующего потери, и, соответственно, качество изготовленного ФЭМ, можно рассматривать $G_{вт\text{мм}}$ – внутреннюю проводимость в точке максимальной мощности:

$$G_{вт\text{мм}} = (I_{кз} - I_{мм}) / U_{мм}$$

В этом случае используются значения тока $I_{мм}$ и напряжения $U_{мм}$ для точки максимальной мощности. Чем больше значение $G_{вт\text{мм}}$, тем больше электрические потери фотоэлектрического модуля. Предложенная модель может быть использована при организации массового контроля изготавливаемых ФЭМ.

Заключение

1. На основе анализа научно-технических источников показано, что сравнительно невысокие значения КПД фотоэлектрических модулей (по разным оценкам предельные значения КПД составляют от 22 % до 30 %) обусловлены оптическими (световыми), рекомбинационными и омическими потерями. Показана сложность расчета и измерения составляющих этих потерь.

2. Предложена модель фотоэлектрического модуля как источника тока с потерями в связи с тем, что в современных ФЭМ ток, поступающий в приемник, мало изменяется в пределах изменения напряжения от нуля до номинального значения (до точки максимальной мощности). Соответственно, рассмотренный ФЭМ с точки зрения теоретических основ электротехники можно отнести к категории реального источника тока.

3. Предложено использовать схему замещения ФЭМ в виде параллельного соединения идеального источника светового тока и резистивного элемента, учитывающего внутренние потери и характеризуемого внутренней проводимостью $G_{\text{вт}}$. Предложенная эквивалентная схема ФЭМ учитывает в комплексе рекомбинационные и омические потери, то есть электрические потери.

4. Проведен анализ электрических потерь с применением предложенной схемы замещения на примере фотоэлектрического модуля «Primas 125». Показана нелинейная зависимость мощности потерь от выходного напряжения. В точке максимальной мощности электрические потери составляют порядка (17–27) % от мощности нагрузки в зависимости от освещенности. В режиме холостого хода электрические потери ФЭМ максимальны.

5. Показана нелинейная зависимость внутренней проводимости $G_{\text{вт}}$ от выходного напряжения. Наибольшие значения $G_{\text{вт}}$ имеют место в режиме холостого хода.

6. Показана зависимость внутренней проводимости $G_{\text{вт}}$ от освещенности. С ростом освещенности внутренняя проводимость возрастает.

7. Предложенная методика оценки электрических потерь может быть использована при массовом контроле изготавливаемых солнечных элементов. В качестве параметра, характеризующего потери, и, соответственно, качество изготовленного ФЭМ, можно рассматривать $G_{\text{втмм}}$ – внутреннюю проводимость в точке максимальной мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Троицкий, А. О.* Основные факторы снижения КПД солнечных установок и способы поддержания номинального КПД / А. О. Троицкий, О. В. Серадская, И. М. Кирпичникова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых ; ФГБОУ высшего профессионального образования Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). – 2015. – Т. 3. – № 1. – С. 222–225.

2. *Дубинин, Д. В.* Энергетическая эффективность работы солнечных батарей в реальных режимах эксплуатации / Д. В. Дубинин, В. Е. Лаевский // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 58–62.

3. *Джумаев, А. Я.* Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции / А. Я. Джумаев // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. 46-й междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: Сибак, 2015. – № 5 (42). – С. 33–40.

4. *Кирпичникова, И. М.* Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды / И. М. Кирпичникова, И. Б. Махсумов // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 56–74.

5. *Алимова, П. Д.* Перспективы использования элементной базы на основе перовскита в солнечной энергетике. Датчики и системы / П. Д. Алимова, В. П. Жалнин, К. А. Лобанова, К. В. Селиванов. – 2023. – № 2. – С. 36–43.

6. *Гарифулина, М. Р.* Модель элемента солнечной батареи типа CIGS / М. Р. Гарифулина, А. И. Власов, В. В. Макачук, Н. Адамовик // Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник». Издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана». – 2012. – № 8. – 12 с.

7. Larisa Zaynutdinova, Rustem Zaynutdinov, Vladimir Ilyichev, Ilya Shurshev. EXPERIMENTAL STUDY INTO DEGRADATION OF A SINGLE-CRYSTAL SILICON PHOTOVOLTAIC MODULE IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF ASTRAKHAN REGION // Proceedings ICOECS 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. IEEE Catalog Number: CFP20S88-USB, ISBN: 978-1-7281-9115-7, 2020. – P. 111–114.

8. *Зайнутдинова, Л. Х.* Экспериментальное исследование нагрева фотоэлектрического модуля «Primas-125» / Л. Х. Зайнутдинова, В. Г. Ильичев, Р. Г. Джамбеков // Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики: сборник трудов российской конференции, 21–23 ноября 2022 г., Санкт-Петербург. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 99–100, ISBN 978-5-7422-7926-6, doi : 10.18720/SPBPU/2/id22-248].

9. *Братышев, С. Н.* Информационно-измерительная система долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей / С. Н. Братышев, Л. Х. Зайнутдинова, В. Г. Ильичев, А. С. Титов // Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации: материалы II Международной научно-технической конференции / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : РИК УГАТУ, 2019. – С. 281–286.

10. *Глиberman, А. Я.* Кремниевые солнечные батареи / А. Я. Глиberman, А. К. Зайцева. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1961. – 72 с.

11. *Фаренбрух, А.* Солнечные элементы: теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб ; пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.: ил.

12. *Андреев, В. М.* Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / В. М. Андреев, В. А. Грилихес, В. Д. Румянцев. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.

13. *Демирчян, К. С.* Теоретические основы электротехники. В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 4-е изд. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Че-
чурин. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с.: ил.

14. *Ильичев, В. Г.* Сравнительный эксперимент по оценке эффективности водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в климатических условиях Юга России / В. Г. Ильичев, Л. Х. Зайнутдинова, Е. И. Теруков, М. Ю. Михайлов // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 13(4). – С. 11–21. – Режим доступа: <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-02>.

15. *Яковенко, А. А.* Энергоэффективность солнечных панелей на малых космических аппаратах типа CubeSat / А. А. Яковенко, К. В. Селиванов // Датчики и системы. – 2020. – № 11. – С. 11–18.