

## АЛГОРИТМ АППРОКСИМАЦИИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОМОДУЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОГО ЗАТЕНЕНИЯ

А.Н. Гаевская

НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоя Сикорского»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056 Украина

*Данная работа посвящена моделированию вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотоэлектрических модулей (ФМ) на основе массива экспериментальных данных, полученных с помощью измерительной схемы с переменной нагрузкой. Определен класс аппроксимирующих функций и построен алгоритм аппроксимации. Соответствующая методика обработки данных, полученных с АЦП микроконтроллера через последовательный интерфейс ПК, предназначена для построения ВАХ и мощностной характеристики в условиях затенения. Методика базируется на построения модельной функции, аппроксимирующей многоступенчатую ВАХ затененных ФМ (кривые получены для четырех уровней затенения). Количество ступеней на экспериментальной ВАХ и количество точек МРР определяется числом обводных диодов в фотомодуле. В качестве примера исследовано влияние вертикального частичного затенения на режим работы поликристаллического ФМ в альбомной ориентации, имеющего два обводных диода. На каждом участке экспериментальная кривая моделируется соответствующим полиномом, при этом ВАХ затененного ФМ представляется как суперпозиция одноступенчатых I-V кривых, каждая из которых описывается однодиодной схемой замещения. Предложенный алгоритм полиномиальной аппроксимации многоступенчатой ВАХ позволяет с большой точностью моделировать характеристики фотомодулей в условиях частичного затенения. Проведено апробирование предложенного класса аппроксимирующих функций на больших массивах экспериментальных данных. Полученные ВАХ позволяют проводить оценки реальных параметров ФМ. Скорость и простота описанной методики создают основу для расчета точных параметров модуля при моделировании его работы в условиях затенения. Это позволит в дальнейшем определять в реальном времени оптимальные рабочие точки в зависимости от изменяющихся условий затенения, а также прогнозировать фотоэлектрическую генерацию массивов ФМ и осуществлять их диагностику. Библ.24, рис.6.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрические станции, фотоэлектрические модули, солнечная радиация, частичное затенение, аппроксимация ВАХ.

## APPROXIMATION ALGORITHM FOR CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF PV MODULES UNDER SHADING CONDITIONS

A. Gaevskaya

NTUU «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
03056, 37, av. Peremogy, Kiev, Ukraine

*This work is devoted to modeling of current-voltage characteristic (CVC) of a PV module on the base of experimental data obtained using a measuring device with a variable load. The class of approximating functions is defined and the approximation algorithm is constructed. The developed method of processing data obtained from the microcontroller's analog-digital converter (ADC) via a PC serial interface is intended for building CVC and power characteristic under shading conditions. The technique is based on the construction of a model function, which approximate a multistage CVC of shaded PV modules (the CVC curves have been obtained for four levels of shading). The number of steps of the obtained experimental curve and the number of maximum power points are determined by the number of bypass diodes in PV module. As an example, the effect of vertical partial shading on the operating mode of a polycrystalline PV module in album orientation with two diodes is investigated. The total experimental curve is modeled by a corresponding piecewise polynomials: the CVC of the partially shaded module is represented as a superposition of two single-step I-V curves, which correspond to a single-diode equivalent circuit. The proposed algorithm for polynomial approximation of a multi-step CVC makes it possible to simulate the characteristics of shaded PV modules with high accuracy. The proposed class of approximating functions was tested on large arrays of raw experimental data. The obtained CVC allows one to estimate the real parameters of PV module. The speed and simplicity of the developed method give the possibility for calculating the PV module parameters on the base of experimental data obtained in field under shading conditions. The method allows to determine in real-time the operating maximum power point in changing of shading conditions, as well as predict the yield of PV module arrays and carry out their diagnostics. Ref. 24, fig. 6.*

**Keywords:** PV plants, PV modules, solar radiation, partial shading, approximation of CVC.



Г.Н. Гаевская  
A. Gaevskaya

**Сведения об авторе:** старший преподаватель кафедры ВИЭ.

**Образование:** Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», электроэнергетический факультет, специальность «Электроизоляционная и кабельная техника».

**Научная сфера:** электрические станции, возобновляемая энергетика, компьютерное моделирование

**Публикации:** 25.

**ORCID:** 0000-0001-7760-6789

**Контакты:** +38 (067) 420-18-57

**e-mail:** ann.gaevskaya@gmail.com

**Автор information:** Senior Lecturer of the Department of RES.

**Education:** National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Faculty of Electricity, specialty "Electrical Insulation and Cable Engineering".

**Research area:** renewable energy, computer simulation.

**Publications:** 25.

**ORCID ID:** 0000-0001-7760-6789

**Contacts:** +38 (067) 420-18-57

**e-mail:** ann.gaevskaya@gmail.com

**Перечень использованных обозначений и сокращений:**

АЦП	- аналого-цифровой преобразователь;	$i_{ph}$	- фототок ФЭЯ;
ВАХ	- вольтамперная характеристика;	$I_{ph}$	- результирующий фототок ФМ;
КЗ	- короткое замыкание;	$I_{sc}$	- ток короткого замыкания;
MPP	- maximum power point (точка максимальной мощности);	$k$	- постоянная Больцмана;
ФМ	- фотоэлектрический модуль;	$n_p$	- число серий ФЭЯ, соединенных между собой параллельно;
ФЭС	- фотоэлектрическая станция;	$n_s$	- число последовательно соединенных ФЭЯ в серии;
ФЭЯ	- фотоэлектрическая ячейка;	$r_s$	- последовательное сопротивление потерь ФЭЯ;
ХХ	- холостой ход;	$r_p$	- параллельное сопротивление потерь ФЭЯ;
A	- коэффициент неидеальности эквивалентного диода фм;	$R_s$	- эквивалентное последовательное сопротивление омических потерь ФМ;
$a_i, b_i, c_i, d_i$	- полиномиальные коэффициенты кусочно-линейной аппроксимации;	$R_p$	- эквивалентное параллельное сопротивление потерь ФМ;
$q$	- заряд электрона;	$V$	- разность потенциалов на электродах ФЭЯ;
$I, V$	- результирующие величины тока и напряжения для ФМ;	$V_{oc}$	- напряжение холостого хода.
$i_o$	- обратный ток насыщения ФЭЯ;		
$I_0$	- обратный ток насыщения эквивалентного диода ФМ;		

**1. Введение и постановка задачи.** В настоящее время наблюдается возрастание доли генерации «зеленой» энергии в различных областях Украины [1]. Общая тенденция к снижению стоимости оборудования, затрат на проектирование и установку ФЭС позволяет прогнозировать рост доли фотогенерации на 40% к 2040 г. Для снижения срока окупаемости фотоэлектрических модулей (ФМ) необходимо повышение эффективности генерации ФМ электроэнергии при различных условиях освещенности [2,3]. В связи с этим актуальны исследования, направленные на оптимизацию углов наклона и азимутальной ориентации ФМ [4, 5], плотности расположения их рядов [6], минимизации влияния затенения на мощность солнечных панелей, составленных из ФМ [6–11]. Как показывает практика, на генерацию существенно влияет отклонение параметров модуля в реальных условиях эксплуатации от паспортных параметров, определяемых в стандартных тестовых условиях (Standard Test Conditions,

STC) [12]. Такие отклонения необходимо учитывать при построении адекватных моделей для компонентов ФЭС, работающих в меняющихся внешних условиях, а также при решении задач прогнозирования выработки электроэнергии.

К настоящему времени разработаны множество моделей, описывающих работу ФМ на активную нагрузку, в том числе, наиболее популярные из них пяти- и семипараметрические модели, представляемые схемами замещения с одним и двумя диодами соответственно [13-16]. Использование этих моделей в расчетах ВАХ и определении параметров ФМ приводит к известным погрешностям в определении основных параметров ФМ: точки максимальной мощности (MPP) и сопротивлений потерь. Более продуктивным для построения систем прогнозирования и анализа работы ФЭС в реальных условиях, является моделирование ВАХ ФМ с помощью аппроксимирующих функций, которые позволяют определять перечисленные выше параметры по

экспериментальным данным, полученным в полевых условиях. Принципиальным моментом в такой процедуре является определение класса аппроксимирующих функций и построение алгоритма аппроксимации. В данной работе решаются следующие задачи:

- Разработка алгоритма обработки данных полученных с АЦП микропроцессора при измерении ВАХ фотомодулей с частичным затенением.
- Разработка методики построения модельной функции, аппроксимирующей многоступенчатую ВАХ затененных ФМ.
- Апробирование предложенного класса функций на больших массивах данных (более 500 отсчетов при измерении ВАХ).

**2. Краткий обзор существующих моделей ФМ.** Основой преобразования солнечной энергии в электрическую является фотоэлектрический эффект. Под воздействием солнечного излучения в полупроводнике, поглощающим фотоны, генерируются носители заряда, в результате чего во внешней цепи протекает ток  $I_{ph}$ . В простейшей модели [12-14] фотоэлектрическая ячейка (ФЭЯ) моделируется с помощью источника тока и диода, описывающего работу рп-перехода при прямом смещении. В этой модели ток через диод  $I_d$  описывается формулой Шокли, и результирующий в нагрузке равен

$$i = i_{ph} - i_0 \left( e^{\frac{qv}{AkT}} - 1 \right) \quad (1)$$

где  $v$  – разность потенциалов на электродах ФЭЯ,  $i_{ph}$  – фототок,  $i_0$  – обратный ток насыщения,  $A$  – коэффициент неидеальности диода,  $k$  – постоянная Больцмана,  $q$  – заряд электрона.

Однако более широко при моделировании ФЭЯ используется 5-параметрическая модель, составленная из линейного независимого источника тока, одного диода, последовательного сопротивления потерь  $r_s$  и шунтирующего источника сопротивления утечек  $r_p$  (рис. 1). В этой модели уравнение, связывающее ток в нагрузке и напряжение, имеет вид:

$$i = i_{ph} - i_0 \left( e^{\frac{q(v-r_s i)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{v + r_s i}{r_p}; \quad (2)$$

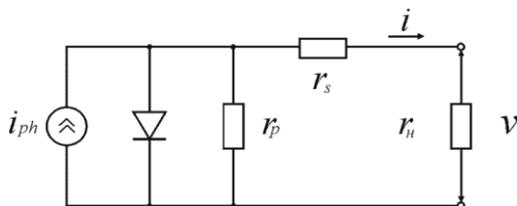


Рис. 1. Однодиодная модель ФЭЯ.  
Fig. 1. Single-diode PV cell model.

Неизвестными параметрами, определяемыми в результате моделирования, являются  $i_0$ ,  $A$ ,  $r_s$ ,  $r_p$ ,  $i_{ph}$ . Более точное описание ВАХ реальных ФЭЯ дает двухдиодная модель [15, 16] с семью варьируемыми параметрами, а также аналитические подходы, предоставляющие точное решение нелинейных уравнений для ВАХ [17-20]. Следует отметить, что коммерческие программы, моделирующие работу ФЭС в различных условиях (например, PVSYS, TRNSYS, PSIM), ограничиваются, как правило, однодиодной моделью [21].

Фотоэлектрический модуль состоит из ФЭЯ, включенных последовательно в серии, а серии соединяются между собой параллельно. Соответствующая схема замещения выглядит, как показано на рис. 2.

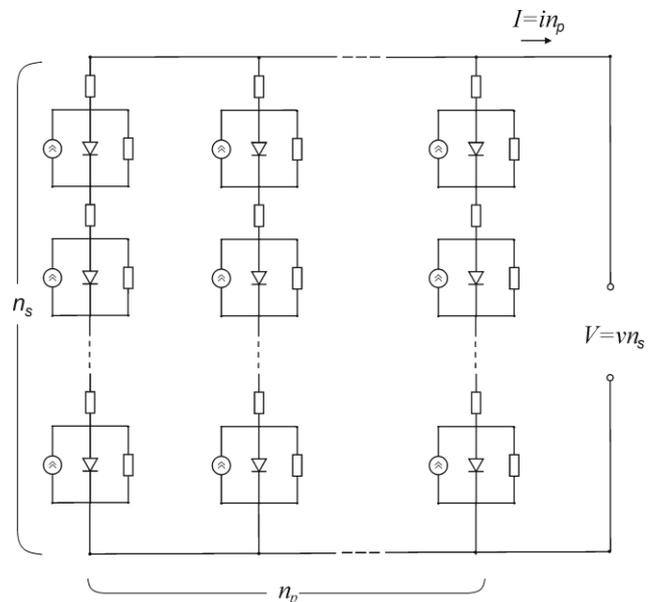


Рис. 2. Модель ФМ как соединение однодиодных схем замещения ФЭЯ.

Fig. 2. Model of the PV module consisted of single-diode equivalent circuits.

Уравнение для тока фотомодуля, согласно схеме замещения, на рис.2, принимает вид:

$$I = \left( 1 + \frac{R_s}{R_p} \right)^{-1} \left\{ I_{ph} - \frac{V}{R_p} - I_0 \left[ e^{\frac{q(V-IR_s)}{An_s kT}} - 1 \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $I = i n_p$ ,  $I_{ph} = i_{ph} n_p$ ,  $I_0 = i_0 n_p$ ,  $V = v n_s$  – результирующие величины токов и напряжения для ФМ,  $R_s = r_s n_s / n_p$ ,  $R_p = r_p n_s / n_p$ .

Основным методом оценки эксплуатационных характеристик солнечных элементов и модулей является измерение ВАХ с дальнейшим

определением параметров ФМ. Нахождение этих параметров выполняется либо аналитически [17-20], либо с помощью итерационных процедур (см., например, [22]).

Следует отметить, что в модели ФМ, представленной выше, фотоэлектрические ячейки являются идентичными и находятся при одинаковых температуре и освещенности. Это требование трудно выполнимо для реальных фотомодулей ФЭС, особенно при несогласованности параметров и частичном затенении ФМ. В связи с этим предлагается методика построения модельной функции для ВАХ фотомодулей, работающих в полевых условиях.

**3. Результаты моделирования ВАХ.** Моделирование ВАХ в данной работе осуществляется на основе массива экспериментальных данных (порядка 300-500 отсчетов «напряжение – ток»), полученных с помощью измерительной схемы с переменной нагрузкой. ВАХ полностью освещенного ФМ (в отсутствии затенения) имеет вид, показанный на рис. 3.

Отметим, что производителями фотомодулей обычно приводится, ограниченный набор характеристик – это, как правило: напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ ), ток короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) и напряжение и ток в точке максимальной мощности (Maximum Power Point, MPP). Эти точки зависят внешних параметров: интенсивность радиации влияет на величину выходного тока, а температура – на выходное напряжение ФМ.

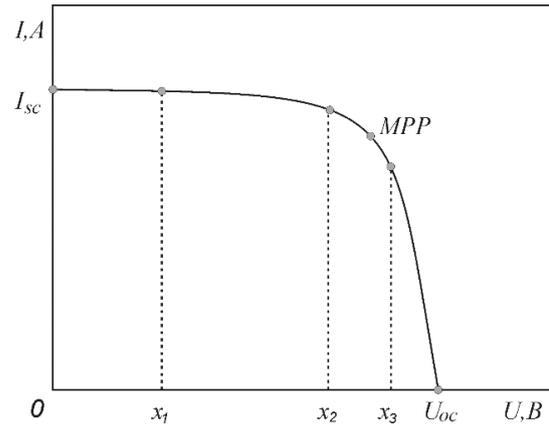


Рис. 3. Разбиение ВАХ полностью освещенного ФМ на характерные участки для аппроксимации.

Fig. 3. Current voltage characteristic of PV module in absence of shading.

К настоящему времени известен ряд работ, в которых выполняется моделирование ВАХ ФМ с помощью различных классов функций (экспоненциальных, как в формуле Шокли [13-15], функции Ламберта [18-20], сплайнов [23], нейронных сетей [24] и др.). Нами предлагается кусочно-полиномиальная аппроксимация ВАХ ФМ в отсутствии затенения с точками сшивания аппроксимант (рис.3). Точка  $x_1$  находится правее точки к.з. в конце линейного участка ВАХ. Точки  $x_2$  и  $x_3$  располагаются левее и правее точки MPP соответственно. Общая формула для модельной функции имеет вид:

$$I(V) = \begin{cases} f_1(V) = a_0 + a_1V, & V \leq x_1 \\ f_2(V) = f_1(x_1) + b_1(V - x_1) + b_2(V - x_1)^2 + b_3(V - x_1)^3, & x_1 \leq V \leq x_2 \\ f_3(V) = f_2(x_2) + c_1(V - x_2) + c_2(V - x_2)^2 + c_3(V - x_2)^3, & x_2 \leq V \leq x_3 \\ f_4(V) = f_3(x_3) + d_1(V - x_3) + d_2(V - x_3)^2, & V > x_3 \end{cases} \quad (3)$$

Функция (3) удовлетворяет условиям непрерывности в точках сшивания  $x_1, x_2, x_3$  аппроксимант  $f_i(V)$ , а определенные соотношения между коэффициентами при степенях полиномов обеспечивают непрерывность производных. Реализация программы аппроксимации в пакете MATLAB по схеме МНК дает определение как коэффициентов разложения (3), так и расположение точек сшивания. Разработанный алгоритм расчета позволяет получить непрерывную кривую хорошо согласующуюся с экспериментальными данными. По полученным в результате аппроксимации коэффициентам аппроксимант можно оценить значения параметров  $R_s$

(эквивалентное последовательное сопротивление омических потерь) и  $R_p$  (эквивалентное параллельное сопротивление утечки). Можно показать, что наклоны ВАХ (динамические проводимости) в области к.з. и х.х. связаны с этими параметрами следующими равенствами:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V \rightarrow 0} = a_1 \approx -\frac{1}{R_p}; \quad \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V \rightarrow V_{oc}} = d_1 + 2d_2(V_{oc} - x_3) \approx -\frac{1}{R_s + \frac{An_s kT}{qI_{ph}}} \quad (4)$$

Измерения ВАХ проводились на поликристаллическом кремниевом ФМ с двумя обводными диодами в НТУУ «КПИ» (г.Киев). Были обеспечены условия затенения рабочей поверхности ФМ, которые отвечают частичному затенению соседними рядами солнечных панелей, составленных из модулей в альбомной (горизонтальной) ориентации. Мониторинг данных измерений ВАХ, получаемых по схеме с переменной резистивной нагрузкой, выполнялся с помощью микроконтроллера Atmel 328. Данные через порт USB ПК передавались в систему обработки данных, включающую в себя монитор последовательного порта и пакет специализированных программ в среде MATLAB. В ходе измерений моделировались различные относительные доли нижнего затенения ( $s$  – относительная доля затененной площади ФМ) от впереди стоящего ряда солнечных панелей.

Данные эксперимента при разной относительной площади  $s$  частичного затенения поликристаллического ФМ мощностью 100Вт, а также результаты выполненной аппроксимации приведены на рис. 4. Кривые с меньшими значениями  $I_{sc}$  соответствуют возрастающей площади тени. ВАХ фотомодуля имеет многоступенчатый характер, соответственно зависимость мощности от напряжения на нагрузке характеризуется несколькими максимумами. Это связано с затенением части модуля и ее шунтированием обводным диодом: Сопротивление затененных ячеек возрастает, они оказываются под напряжением обратного смещения и шунтируются обводным диодом. При этом результирующий ток падает и уменьшается мощность генерации ФМ. Влияние частичного затенения на генерацию ФЭС, а также задачи оптимизации расположения рядов ФМ в условиях наличия затенения рассмотрены в статье [6].

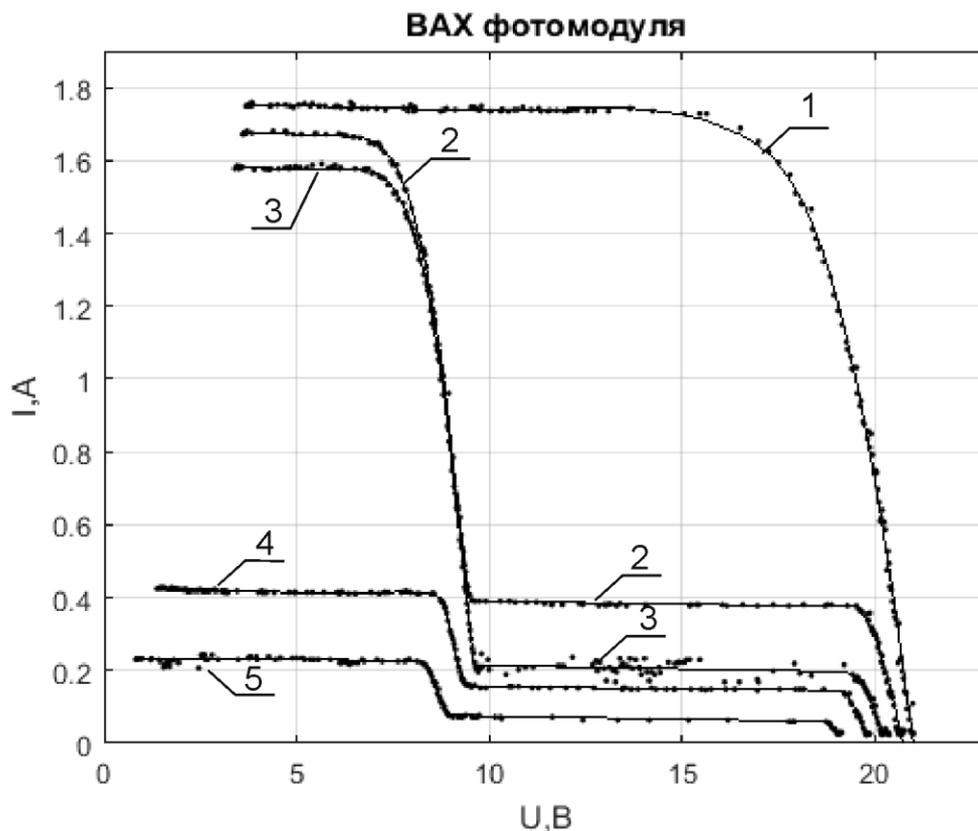


Рис. 4. ВАХ поликристаллического ФМ при  $s=0,0.25,0.5,0.75,1$  (кривые 1–5 соответственно): эксперимент (точки); модельные кривые (сплошные линии).

Fig. 4. CVC of the polycrystalline PV module at  $s = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$  (curves 1–5, respectively): experiment (points); model curves (solid lines).

Сложность моделирования подобного типа характеристик заключается в необходимости корректного разбиения общей кривой ВАХ на участки, обусловленные либо ролью обводных

диодов, либо неоднородным характером освещенности.

В данной работе предложен алгоритм, в котором ВАХ фотомодуля представляется как су-

перпозиция одноступенчатых  $I-V$  кривых, каждая из которых описывается однодиодной схемой замещения.  $I-V$  кривые разбиваются на характерные участки на каждом из которых аппроксимирующий полином подгоняется под экспериментальные данные при выполнении условий непре-

рывности аппроксимант и их производных в точках сшивания. В рассмотренном примере затенения полная двухступенчатая кривая ВАХ разбивается на две компоненты, каждая из которых моделируется четырьмя участками согласно аппроксимации (3).

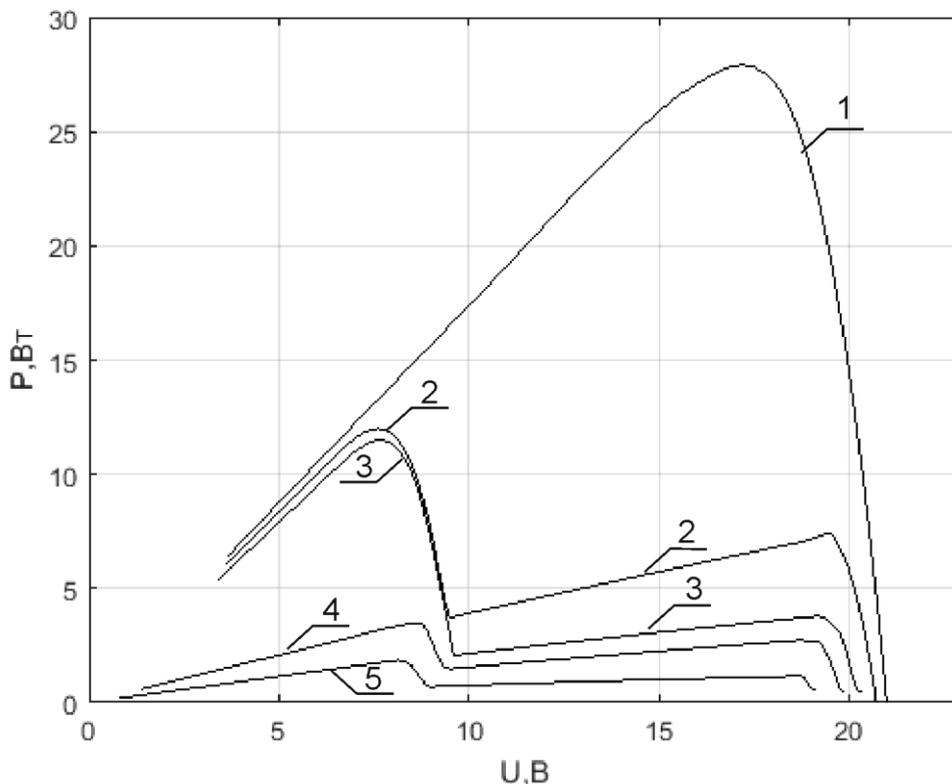


Рис. 5. Зависимость мощности в резистивной нагрузке от напряжения для ФМ при  $s=0,0.25,0.5,0.75,1$  (кривые 1–5 соответственно).

Fig. 5. Dependence of power in resistive load on voltage for PV module at  $s = 0,0.25,0.5,0.75,1$  (curves 1–5, respectively): experiment (points); model curves (solid lines).

В точках разделения массивов данных, соответствующих отключению части ФМ, эти полиномиальные кривые сшиваются и, в результате, получается полная модельная кривая всего ФМ. Аппроксимации ВАХ модуля позволяет получить более точные кривые, рассчитать по ним значения мощности и определить МРР. Полученные в результате аппроксимации полиномиальные коэффициенты позволяют оценить сопротивления потерь  $r_s$  и  $r_p$ . Далее пользуясь предложенными в литературе моделями [12-15] можно с помощью итерационных методов определить более точно параметры модулей ( $i_0, A, r_s, r_p, i_{ph}$ ) при различных степенях затенения для построения модели работы ФЭС.

**4. Алгоритм обработки данных.** Для обработки экспериментальных данных и подготовки их к моделированию ФМ предлагается алгоритм аппроксимации ВАХ фотоэлектрического модуля в условиях частичного затенения.

ВАХ получены для четырех уровней затенения. Оценочным путем на основе ВАХ подбираются параметры  $x_1, x_2, x_3$  аппроксимирующей функции для каждого участка. Разбиение на четыре участка проводится соответственно общей формуле модельной функции (3), аппроксиманты по условиям непрерывности их самих и их производных сшиваются в непрерывную кривую (Рис.4). Алгоритм обработки данных приведен на рис. 6.

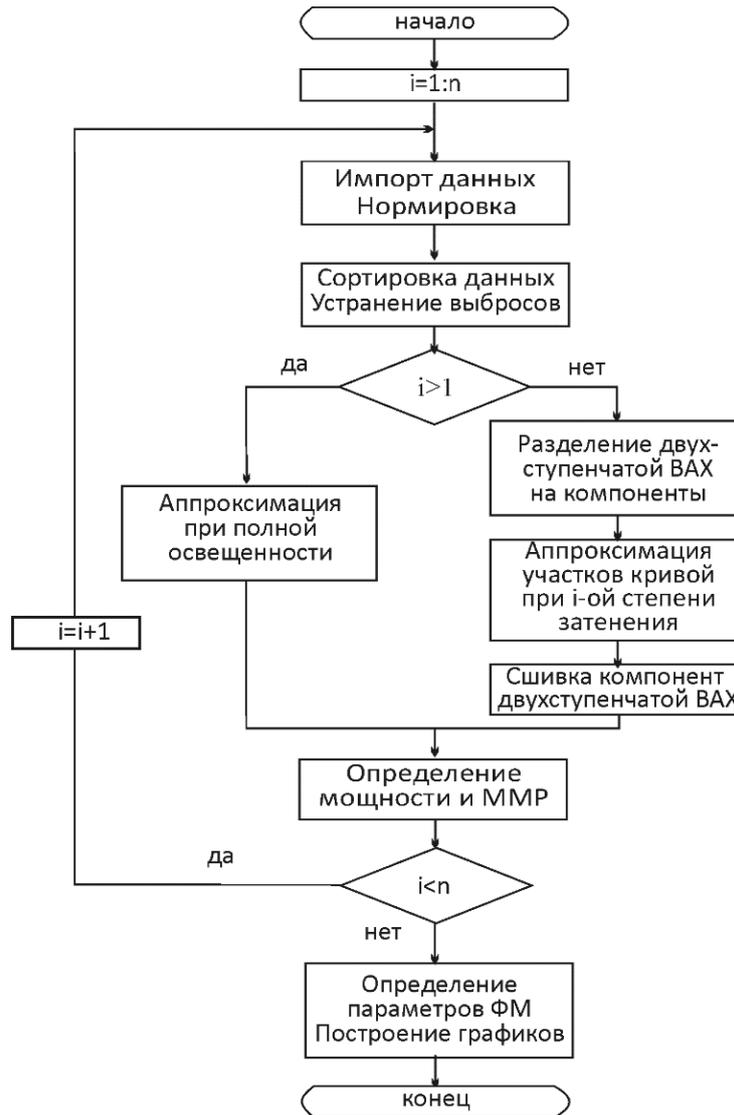


Рис. 6. Алгоритм аппроксимации данных ВАХ, полученных при различных долях затенения.

Fig. 6. The approximations algorithm for CVC obtained with different ratio shading.

Работа программы начинается со считывания поочередно из списка  $i=1:n$  файлов Excel, полученных с АЦП микроконтроллера для различных степеней освещенности. Затем данные из текущего  $i$ -го файла – значения тока и напряжения на выходе модуля, импортируются в отведенные для их сохранения и обработки массивы. Поскольку во время эксперимента меняются уровень освещенности и угол падения солнца, данные должны нормироваться по степени освещенности и быть отсортированы по напряжению. Получаемый массив данных для одной степени затенения достаточно велик (порядка 500–800 отсчетов «напряжение – ток»). Совершенно небольшая часть из этих отсчетов (менее 1–2%) содержат заведомо ошибочные значения, которые не отвечают физическим условиям эксперимента. Такие точки считались в данной работе «выбросами» и удалялись из массива общего «сырых»

данных. После такой предварительной подготовки данных, согласно алгоритма на рис.6, следует выбор вида аппроксимации. Для каждого модуля, как уже упоминалось, данные содержат  $n$  файлов: первый – характеристика, снятая в отсутствии затенения, остальные – по нарастающему значению  $s$ .

В первом случае, в отсутствие затенения, модельная функция применяется ко всему диапазону изменения напряжения, то есть выполняется полиномиальная аппроксимация для одноступенчатой ВАХ с использованием формул (3). В случаях с частичным затенением двухступенчатая ВАХ разделяется оптимальным образом на сумму двух компонент: освещенной и затененной серий ячеек. Каждая из этих компонент аппроксимируется отдельно, а затем компоненты объединяются в единую кривую ВАХ согласно описанной выше методике.

По результатам аппроксимации определяют мощности и МРР, строятся графики (рисунки 4,5), оцениваются значения параметров  $R_s$  и  $R_p$  (4). Завершается работа программы выводом на печать графиков, результатов аппроксимации, полиномиальных коэффициентов.

**Выводы.** Для диагностики фотомодулей ФЭС в полевых условиях важно иметь удобную методику определения вольтамперных и мощностных характеристик ФМ, которая позволяет выполнять измерения и обрабатывать данные с учетом значительных флуктуаций внешних условий и при возможном наличии частичного затенения. В данной статье разработан алгоритм получения экспериментальных данных и обработки результатов измерений на ФМ, позволяющий достаточно точно аппроксимировать ВАХ и получать на ее основе мощностную характеристику в условиях частичного и полного затенения.

Алгоритм апробирован на больших массивах «сырых» данных, полученных в полевых условиях, и получено хорошее совпадение с экспериментальными кривыми. Полученные ВАХ позволяют проводить оценки реальных параметров ФМ. Скорость и простота описанной методики создают основу для расчета точных параметров модуля при моделировании его работы в условиях затенения. Это позволит в дальнейшем определять реальное время оптимальные рабочие точки в зависимости от меняющихся условий затенения, а также прогнозировать фотоэлектрическую генерацию массивов ФМ и осуществлять их диагностику.

1. *Kudrya S.O.* Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. К. НТУУ "КПІ". 2012. 489 с.
2. *Дэффи Дж.А.* Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М. Мир. 1977. 420 с.
3. *Markvart T., Castafier L.* Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Oxford. UK. Elsevier. 2003. 988 p.
4. *Mondol J.D., Yohanis Y.G., Norton B.* The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*. 2007. v. 32. Pp. 118-140.
5. *Гаевский А.Ю., Гаевская А.Н.* Метод определения оптимального угла наклона и ориентации фотоэлектрических модулей на основе экспериментальных данных солнечной радиации. *Альтернативная энергетика и экология*. 2018. № 13-15. С.15-29.
6. *Гаевский А.Ю., Демин Д.А.* Влияние угла наклона и плотности расположения фотомодулей на эффективность ФЭС. *Альтернативная энергетика и экология*. 2018. № 25-30. С.12-24.
7. *Rauschenbach H.S.* Electrical output of shadowed solar arrays. *IEEE Trans. Electron Dev.* 1971. v. 1. No.8. [Электронный ресурс]. URL: <http://dx.doi.org/>.
8. *Kawamura H. et al.* Simulation of I-V characteristics of a PV module with shaded PV cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2003. v. 75. Pp. 613-621.

9. *Quaschnig V., Hanitsch R.* Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells. *Sol. Energy*. 1996. v. 56. Pp. 513-520.
10. *Deline C.* A simplified model of uniform shading in large photovoltaic arrays. *Solar Energy*. 2013. v. 96. Pp. 274-282.
11. *Abdullah Al Mamun M.* Experimental investigation of the effect of partial shading on photovoltaic performance. *IET Renewable Power Generation*. 2017. v. 11. No. 7. Pp. 912-921.
12. *Bishop J.W.* Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits. *Solar Energy Mater. Solar Cells*. 1988. v. 25. Pp. 73-89.
13. *Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д.* Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л. Наука. 1989. 310 с.
14. *Ma J., Man K.* Approximate Single-Diode Photovoltaic Model for Efficient I-V Characteristics Estimation. *The Scientific World Journal*. 2013. v. 2013. 7 p. Article ID 230471.
15. *Tamrakar V.I., Gupta S.C. et al.* Single-diode and two-diode pv cell modeling using matlab for studying characteristics of solar cell under varying conditions. *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ)*. 2015. v. 4. No. 2.
16. *Miceli R., Orioli A., Di Gangi A.* A procedure to calculate the I-V characteristics of thin-film photovoltaic modules using an explicit rational form. *Applied Energy*. 2015. v. 155. Pp. 613-628.
17. *Jia Q.X., Ebiharaand K., Ikegami T.* Analytical solution for solar cell model parameters from illuminated current-voltage characteristics. *Philosophical Magazine B*. 1995. Vol. 7. Pp. 375-382.
18. *Ortiz-Conde A., Garcia Sanchez F.J., Muci J.* New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I-V characteristics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2006. v. 90. Pp. 352-361.
19. *Zhang C., Zhang J., Hao Y. et al.* A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve. *Journal of Applied Physics*. 2011. v. 110. p. 064504
20. *Гаевский А.Ю.* Определение параметров фотоэлектрических модулей на основе точного решения уравнения для ВАХ. *Відновлювана енергетика*. 2012. № 4. С. 32-39.
21. *Woyte A., Nijs J., Belmans R.* Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature survey and field results. *Solar Energy*. 2003. v. 74. Pp. 217-233.
22. *Ferhat-Hamida A., Ouennoughi Z., Holmann A., Weiss R.* Extraction of Schottky diode parameters including parallel conductance using a vertical optimization method. *Solid-State Electronics*. 2002. v. 46. Pp. 615-619.
23. *Kong K.C., Mamat M., Ibrahim M.Z.* New Approach on Mathematical Modeling of Photovoltaic Solar Panel. *Applied Mathematical Sciences*. 2012. v. 6. No. 8. Pp. 381-401.
24. *Karatepe E., Boztepe M., Colak M. et al.* Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells. *Solar Energy*. 2007. v. 81. Pp. 977-992.

## REFERENCES

1. *Kudrya S.O.* Нетрадиційна та відновлювана енергетика. [Alternative and Renewable Energy]. Kyiv. NTUU "KPI". 2012. 490 p. [in Ukrainian].
2. *Daffi Dzh.A.* Teplovye processy s ispolzovaniem solnechnoj energii. [Heat processes using solar energy]. М. Мир. 1977. 420 p. [in Russian].
3. *Markvart T., Castafier L.* Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Oxford. UK. Elsevier. 2003. 988 p. [in English].
4. *Mondol J.D., Yohanis Y.G., Norton B.* The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*. 2007. v. 32.

Pp. 118-140. [in English].

5. *Gaevskij A.Yu., Gaevskaya A.N.* Metod opredeleniya optimalnogo ugla naklona i orientacii fotoelektricheskikh modulej na osnove ehksperimentalnykh dannykh solnechnoj radiacii. [Method for determining of the optimal title angle and orientation of PV modules based on solar radiations data]. *Alternativnaya ehnergetika i ehkologiya*. 2018. №13-15. Pp.15-29. [in Russian].

6. *Gaevskij A.Yu., Demin D.A.* Vliyanie ugla naklona i plotnosti raspolozheniya fotomodulej na ehffektivnost FES. [Influence of tilt angles and arrangement dencity of PV moduls on the efficiency of PV system]. *Alternativnaya ehnergetika i ehkologiya*. 2018. No. 25-27. Pp. 273-275. [in Russian].

7. *Rauschenbach H.S.* Electrical output of shadowed solar arrays. *IEEE Trans. Electron Dev.* 1971. v. 1. No. 8. [Electronic resource]. URL: <http://dx.doi.org/>. [in English].

8. *Kawamura H. et al.* Simulation of I-V characteristics of a PV module with shaded PV cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2003. v. 75. Pp. 613-621. [in English].

9. *Quaschnig V., Hanitsch R.* Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells. *Sol. Energy*. 1996. v. 56. Pp. 513-520. [in English].

10. *Deline C.* A simplified model of uniform shading in large photovoltaic arrays. *Solar Energy*. 2013. v. 96. Pp. 274-282. [in English].

11. *Abdullah Al Mamun M.* Experimental investigation of the effect of partial shading on photovoltaic performance. *IET Renewable Power Generation*. 2017. v. 11. No. 7. Pp. 912-921. [in English].

12. *Bishop J.W.* Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits. *Solar Energy Mater. Solar Cells*. 1988. v. 25. Pp. 73-89. [in English].

13. *Andreev V.M., Griliches V.A., Romyancev V.D.* Fotoelektricheskoe preobrazovanie koncentrirovannogo solnechnogo izlucheniya. [Photoelectric Conversion of Concentrated Solar Radiation]. *L. Nauka*. 1989. 310 p. [in Russian].

14. *Ma J., Man K.* Approximate Single-Diode Photovoltaic Model for Efficient I-V Characteristics Estimation. *The Scientific World Journal*. 2013. v. 2013. 7 p. Article ID 230471. [in English].

15. *Tamrakar V.L., Gupta S.C. et al.* Single-diode and two-diode pv cell modeling using matlab for studying characteristics of solar cell under varying conditions. *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ)*. 2015. v. 4. No. 2. Pp. 67-77. [in English].

16. *Miceli R., Orioli A., Di Gangi A.* A procedure to calculate the I-V characteristics of thin-film photovoltaic modules using an explicit rational form. *Applied Energy*. 2015. v. 155. Pp. 613-628. [in English].

17. *Jia Q.X., Ebiharaand K., Ikegami T.* Analytical solution for solar cell model parameters from illuminated current-voltage characteristics. *Philosophical Magazine B*. 1995. Vol. 7. Pp. 375-382. [in English].

18. *Ortiz-Conde A., Garcia Sanchez F.J., Muci J.* New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I-V characteristics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2006. v. 90. Pp. 352-361. [in English].

19. *Zhang C. Zhang J., Hao Y. et al.* A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve. *Journal of Applied Physics*. 2011. v. 110. p. 064504. [in English].

20. *Gaevskij A.Yu.* Opredelenie parametrov fotoelektricheskikh modulej na osnove tochnogo resheniya uravneniya dlya

VAH. [Determination of the PV modules parameters based on the exact solution of CVC equation]. *Vidnovlyuvana energetika*. 2012. No. 4. Pp. 32-39. [in Russian].

21. *Woyte A., Nijs J., Belmans R.* Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature survey and field results. *Solar Energy*. 2003. v. 74. Pp. 217-233. [in English].

22. *Ferhat-Hamida A., Ouennoughi Z., Hoffmann A., Weiss R.* Extraction of Schottky diode parameters including parallel conductance using a vertical optimization method. *Solid-State Electronics*. 2002. v. 46. Pp. 615-619. [in English].

23. *Kong K.C., Mamat M., Ibrahim M.Z.* New Approach on Mathematical Modeling of Photovoltaic Solar Panel. *Applied Mathematical Sciences*. 2012. v. 6. No. 8. Pp. 381-401. [in English].

24. *Karatepe E., Boztepe M., Colak M. et al.* Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells. *Solar Energy*. 2007. v. 81. Pp. 977-992. [in English].

### АЛГОРИТМ АПРОКСИМАЦІЇ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОМОДУЛІВ В УМОВАХ ЧАСТКОВОГО ЗАТІНЕННЯ

А.Н. Гаєвська

НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сикорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056 Україна

*Дана робота присвячена моделюванню вольтамперної характеристики (ВАХ) фотоелектричних модулів (ФМ) на основі масиву експериментальних даних, отриманих за допомогою вимірювальної схеми зі змінним навантаженням. Визначено клас апроксимуючих функцій та побудований алгоритм апроксимації. Відповідна методика обробки даних, отриманих з АЦП мікроконтролера через послідовний інтерфейс ПК, призначена для побудови ВАХ та потужності характеристик в умовах затінення. Методика базується на побудові модельної функції, яка апроксимує багатоступеневу ВАХ затінених ФМ (криві отримані для чотирьох рівнів затінення). Кількість ступенів на експериментальній ВАХ і кількість точок MPP визначається числом обвідних діодів у фотомодулі. Як приклад досліджено вплив вертикального часткового затінення на режимі роботи полікристалічного ФМ альбомної орієнтації з двома діодами. На кожній ділянці експериментальна крива моделюється відповідним поліномом, при цьому ВАХ затіненого ФМ представляється як суперпозиція одноступінчастих I-V кривих, кожна з яких описується однодіодною схемою заміщення. Запропонований алгоритм поліноміальної апроксимації багатоступінчастої ВАХ дозволяє з великою точністю моделювати характеристики фотомодулів в умовах часткового затінення. Проведено апробацію запропонованого класу апроксимуючих функцій на великих масивах «сирих» експериментальних даних. Отримані ВАХ дозволяють проводити оцінки реальних параметрів ФМ. Швидкість і простота описаної методики створюють основу для розрахунку точних параметрів модуля при моделюванні його роботи в умовах затінення. Це дозволить в подальшому визначати в реальному часі оптимальні робочі точки в залежності від мінливих умов затінення, а також прогнозувати фотоелектричну генерацію масивів ФМ і здійснювати їх діагностику. Бібл.24, рис.6.*

**Ключові слова:** фотоелектричні станції, фотоелектричні модулі, сонячна радіація, часткове затінення, апроксимація ВАХ.

Стаття надійшла до редакції 07.12.18

Остаточна версія 20.09.19