

Л.ДЖ. ВАРДАНИЯ

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА SPVSYSTEM ДЛЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

Рассмотрены математические модели и обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования фотоэлектрических систем (ФЭС) как автономного режима работы, так и соединяющихся с сетями общего электроснабжения. Представлена разработанная компьютерная программа SPVSYSTEM, которая предназначена для автоматизированного проектирования экономически выгодных ФЭС.

Ключевые слова: экономически выгодная фотоэлектрическая система, автоматизированное проектирование, программное средство SPVSYSTEM.

Введение. На сегодняшний день солнечная энергетика играет огромную роль в решении энергетических проблем всего человечества. Перспективная технология использования солнечного излучения заключается в фотоэлектрическом преобразовании прямых солнечных лучей в электрическую энергию. Преимущества фотоэлектрических станций в том, что они бесшумные, не загрязняют окружающую среду и требуют малого техобслуживания. Фотоэлектрические системы могут быть установлены близко к энергопотребителю, сокращая затраты на длинные электропроводки.

Основной проблемой использования ФЭС является их большая себестоимость. Высокая цена электроэнергии, получаемая от ФЭС, главным образом зависит от цен составных узлов ФЭС [1]. Однако оптимальное решение проблемы себестоимости ФЭС дает возможность получить экономически эффективную ФЭС с оптимальной структурой [2]. Для проектирования экономически эффективных ФЭС необходимо соответствующее программное средство, которое позволит произвести автоматизированное проектирование ФЭС. В данной работе представлена разработанная компьютерная программа SPVSYSTEM, которая предназначена для автоматизированного проектирования экономически выгодных ФЭС как автономного режима работы, так и ФЭС, соединяющихся с общей сетью электроснабжения. Реализация компьютерной программы SPVSYSTEM основана на решении задачи оптимального распределения ресурсов ФЭС (количество фотоэлектрических преобразователей, контроллеров и аккумуляторов заряда, а также инверторов тока) [3-4], в результате которого получается ФЭС с минимальной себестоимостью. Решение данной задачи оптимального распределения ресурсов ФЭС основывается на методах решения задач целочисленного линейного прог-

раммирования [4-6], где целевая функция оптимизации и налагаемые на нее ограничения имеют линейную зависимость.

Общий вид минимизируемой целевой функции себестоимости ФЭС описывается следующим выражением:

$$\min_x F_C(x) = \min_x \{C_T(x) + C_M(x)\}, \quad (1)$$

где $F_C(x)$ - суммарная себестоимость ФЭС; $C_T(x)$, $C_M(x)$ - капитальные и эксплуатационные затраты ФЭС, а $x = \{N_{PV}^i, N_{Bat}^j, N_{Ch}^k, N_{Inv}^m\}$ - вектор искомых значений количества составных узлов ФЭС.

Постановка задачи оптимизации себестоимости ФЭС автономного режима работы. Математическая задача оптимизации себестоимости ФЭС автономного режима работы главным образом определяется ценами составных компонентов ФЭС (фотопреобразователи, контроллеры заряда, электрические аккумуляторы и инверторы тока), их годовыми эксплуатационными затратами и эксплуатационным сроком электрических аккумуляторов.

Для оптимизации задачи себестоимости ФЭС автономного режима работы, когда количество моделей соответствующих составных узлов больше единицы, разработана следующая обобщенная целевая функция:

$$\begin{aligned} F_C(N_{PV}^p, N_{Bat}^p, N_{Ch}, N_{Inv}) = & \sum_{i=1}^{n_{PV}} N_{PV}^{pi} \cdot (C_{PV}^i + 20 \cdot M_{PV}^i) + \\ & + \sum_{j=1}^{n_{Bat}} N_{Bat}^{pj} \cdot (C_{Bat}^j + (20 - \gamma_{Bat}^j - 1) \cdot M_{Bat}^j) + \sum_{k=1}^{n_{Ch}} N_{Ch}^k \cdot (C_{Ch}^k + 20 \cdot M_{Ch}^k) + \\ & + \sum_{m=1}^{n_{Inv}} N_{Inv}^m \cdot (C_{Inv}^m + 20 \cdot M_{Inv}^m) \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (2)$$

где C_{PV}^i , C_{Bat}^j , C_{Ch}^k , C_{Inv}^m , M_{PV}^i , M_{Bat}^j , M_{Ch}^k , M_{Inv}^m - соответственно значения цен (у.е.) и годовые эксплуатационные затраты (у.е./годы) i -го фотопреобразователя, j -го аккумулятора заряда, k -го контроллера заряда и m -го инвертора тока в течение 20-ти лет эксплуатационного срока ФЭС; γ_{Bat}^j - эксплуатационный срок (у.е./годы) аккумуляторов заряда; N_{PV}^i , N_{Bat}^j , N_{Ch}^k , N_{Inv}^m - соответственно искомые значения количества параллельно соединяемых i -го фотопреобразователя, j -го электрического аккумулятора, k -го контроллера заряда, m -го инвертора тока; n_{PV} , n_{Bat} , n_{Ch} , n_{Inv} - соответственно количество моделей фотопреобразователя, аккумулятора заряда, контроллера заряда и инвертора тока. Количество моделей часто на практике принимается равным единице (т.е. $n_{PV} = 1$, $n_{Bat} = 1$, $n_{Ch} = 1$, $n_{Inv} = 1$), так как при построении ФЭС целесообразно иметь соответствующие составные компоненты одной модели, а не комбинацию из нескольких моделей. Следовательно, общий вид обобщенной целевой функции (2) будет упрощен.

Для решения задачи оптимального распределения ресурсов ФЭС автономного режима работы ограничения, налагаемые на электрические параметры составных узлов ФЭС, для общего случая ($n_{PV} \neq 1$, $n_{Bat} \neq 1$, $n_{Ch} \neq 1$, $n_{Inv} \neq 1$) представлены следующей системой линейных неравенств:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^{n_{PV}} Mod_i^{DrFct} \cdot I_{PV\ STC}^{mppi} \cdot N_{PV}^{p_i} \geq \frac{LoadsAmpHrs}{\eta_{SA} \cdot PSH}, \\
& \sum_{j=1}^{n_{Bat}} Cap_{Bat\ nom}^j \cdot N_{Bat}^{p_j} \geq \frac{LoadsAmpHrs}{\eta_{SA}} \cdot \frac{AutonomyDays}{DOD \cdot T}, \\
& \sum_{k=1}^{n_{Ch}} I_{Ch}^k \cdot N_{Ch}^k \geq 1.25 \cdot \sum_{i=1}^{n_{PV}} I_{PV\ STC}^{SC_i} \cdot N_{PV}^{p_i}, \\
& \sum_{m=1}^{n_{Inv}} P_{Inv\ out}^m \cdot N_{Inv}^m \geq ACLoadPw, \\
& N_{PV}^{s_i} = \frac{PVSysNomDC\ Volt}{V_{PV\ nom}^i}, \\
& N_{Bat}^{s_i} = \frac{PVSysNomDC\ Volt}{V_{Bat\ nom}^j}, \\
& N_{PV}^{p_i} \geq 0, N_{Bat}^{p_j} \geq 0, N_{Ch}^m \geq 0, N_{Inv}^m \geq 0, \\
& N_{PV}^{p_i} \in Z, N_{Bat}^{p_j} \in Z, N_{Ch}^m \in Z, N_{Inv}^m \in Z,
\end{aligned} \tag{3}$$

где Z - множество целых чисел; Mod_i^{DrFct} - коэффициент уменьшения значения силы тока i -го фотопреобразователя при стандартных условиях работы, когда интенсивность солнечного излучения $1000\ Bm/m^2$, а температура окружающей среды $25^\circ C$; $I_{PV\ STC}^{mppi}$ и $I_{PV\ STC}^{SC_i}$ - соответственно максимальное значение тока и ток замыкания (A) i -го фотопреобразователя при стандартных условиях работы; $LoadsAmpHr$ - среднеедневное количество энергии ($Aч$), необходимое для электрических нагрузок переменного и постоянного токов; PSH - среднеедневное значение солнечного излучения данной географической местности ($Bmч/m^2/день$); I_{Ch}^k - ток (A) k -го контроллера заряда; $\eta_{SA} = \eta_{Bat} \cdot \eta_{Ch} \cdot \eta_{wire} \cdot \eta_{Inv}$ - коэффициент эффективности ФЭС автономного режима работы; $Cap_{Bat\ nom}^j$ - номинальная емкость j -го аккумулятора заряда ($Aч$); $AutonomyDays$ - количество несолнечных дней; DOD - глубина разрядки (%) аккумулятора; T - коэффициент изменения значения емкости аккумулятора в зависимости от температуры окружающей среды; $P_{Inv\ out}^m$ - максимальная выходная мощность (Bm) m -го инвертора тока; $ACLoadPw$ - суммарная мощность (Bm) электрических нагрузок переменного тока; $N_{PV}^{s_i}$, $N_{Bat}^{s_j}$ - количество параллельно соединяемых i -го фотопреобразователя и j -го аккумулятора заряда; $PVSysNomDCVolt$ - номинальное постоянное напряжение (B) ФЭС; $V_{PV\ nom}^i$ и $V_{Bat\ nom}^j$ - соответственно номинальное напряжение i -го фотопреобразователя и j -го аккумулятора заряда.

Постановка задачи оптимизации себестоимости ФЭС, соединяющихся с общей сетью электроснабжения. Математическая задача оптимизации себестоимости ФЭС, соединяющихся с общей сетью электроснабжения, определяется главным образом ценами составных компонентов ФЭС (фотопреобразователей и инверторов тока), а также их годовыми эксплуатационными затратами.

Для оптимизации задачи себестоимости ФЭС, соединяющихся с общей сетью электроснабжения, разработана следующая целевая функция:

$$F_C(N_{PV}, N_{Inv}) = \sum_{i=1}^{n_{PV}} N_{PV}^i \cdot (C_{PV}^i + 20 \cdot M_{PV}^i) + \sum_{m=1}^{n_{Inv}} N_{Inv}^m \cdot (C_{Inv}^m + 20 \cdot M_{Inv}^m) \rightarrow \frac{\min}{N_{PV}^i, N_{Inv}^m, i=1, n_{PV}, m=1, n_{Inv}}. \quad (4)$$

Для решения задачи оптимального распределения ресурсов ФЭС, соединяющихся с общей сетью электроснабжения, ограничения, налагаемые на электрические параметры составных узлов ФЭС, для общего случая ($n_{PV} \neq 1$, $n_{Inv} \neq 1$) представлены в виде следующей системы линейных неравенств:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_{PV}} P_{PV\ PTC}^{mpp\ i} \cdot N_{PV}^i &\geq \frac{PV\ SysKWHrsDay}{\eta_{GC} \cdot PSH}, \\ \sum_{m=1}^{n_{Inv}} P_{Inv\ out}^m \cdot N_{Inv}^m &\geq \sum_{i=1}^{n_{PV}} P_{PV\ STC}^{mpp\ i} \cdot N_{PV}^i, \\ \sum_{i=1}^{n_{PV}} V_{PV}^{mpp\ i} \cdot k_1 \cdot N_{PV}^i &\geq \sum_{m=1}^{n_{Inv}} Inv_{minInDCVolt}^m \cdot N_{Inv}^m, \\ \sum_{i=1}^{n_{PV}} V_{PV}^{oc\ i} \cdot k_2 \cdot N_{PV}^i &\leq \sum_{m=1}^{n_{Inv}} Inv_{maxInDCVolt}^m \cdot N_{Inv}^m, \\ N_{PV}^i &\geq 0, N_{Inv}^m \geq 0, \\ N_{PV}^i &\in Z, N_{Inv}^m \in Z, \end{aligned} \quad (5)$$

где $P_{PV\ STC}^{mpp\ i}$ и $P_{PV\ PTC}^{mpp\ i}$ - соответственно максимальные значения мощности (Bm) i -го фотопреобразователя при стандартных (интенсивность солнечного излучения $1000\ Bm/m^2$, температура окружающей среды $25^\circ C$) и нестандартных (интенсивность солнечного излучения $800\ Bm/m^2$, температура окружающей среды $20^\circ C$) условиях работы фотопреобразователя; $PV\ SysKWHrsDay$ - необходимое количество суточной электроэнергии, производимой ФЭС; $\eta_{GC} = \eta_{wire} \cdot \eta_{Inv}$ - коэффициент эффективности ФЭС; $P_{Inv\ out}^m$ - выходная мощность (Bm) m -го инвертора тока; $V_{PV}^{mpp\ i}$ и $V_{PV}^{oc\ i}$ - соответственно максимальное напряжение (B) и значение напряжения холостого хода (B) i -го фотопреобразователя; $Inv_{minInDCVolt}^m$ и $Inv_{maxInDCVolt}^m$ - соответственно минимальное и максимальное значения входного постоянного напряжения (B) m -го инвертора тока; k_1 - коэффициент, учитывающий потери мощности фотопреобразователя при температуре окружающей среды $+70^\circ C$ (для моно- и поликристаллических силицированных фотопреобразователей $k_1 = 0,82$, а для тонкопленочных - $k_1 = 0,91$); k_2 - коэффициент, учитывающий потери мощности фотопреобразователя при температуре окружающей среды $-10^\circ C$ (для моно- и поликристаллических силицированных фотопреобразователей

$k_2 = 1,14$, а для тонкопленочных - $k_2 = 1,07$); N_{PV}^i и N_{Inv}^m - соответственно количество i -го фотопреобразователя и m -го инвертора тока.

Таким образом, главной целью решения задачи оптимального распределения ресурсов ФЭС, т.е. получения экономически эффективной ФЭС с оптимальной структурой, является нахождение точно описывающих зависимостей электрических параметров составных узлов ФЭС от необходимого их количества.

Математические задачи оптимизации себестоимости ФЭС ((2), (3) и (4), (5)), будучи задачами целочисленного линейного программирования [4, 5], решены методом сечения Гомори. Этот метод является модификацией симплекс-метода Джорджа Данцига [4, 5]. Время выполнения алгоритма зависит от числа искомых переменных и увеличения числа ограничений.

Описание обобщенного алгоритма проектирования ФЭС. С целью создания системы автоматизированного проектирования ФЭС разработан обобщенный алгоритм проектирования ФЭС [6-8]. Проектирование экономически эффективных ФЭС требует системного подхода, так как задачи оптимального распределения ресурсов ФЭС многопараметрические.

Блок-схема обобщенного алгоритма проектирования оптимального варианта ФЭС с минимальной себестоимостью приведена на рис. 1.

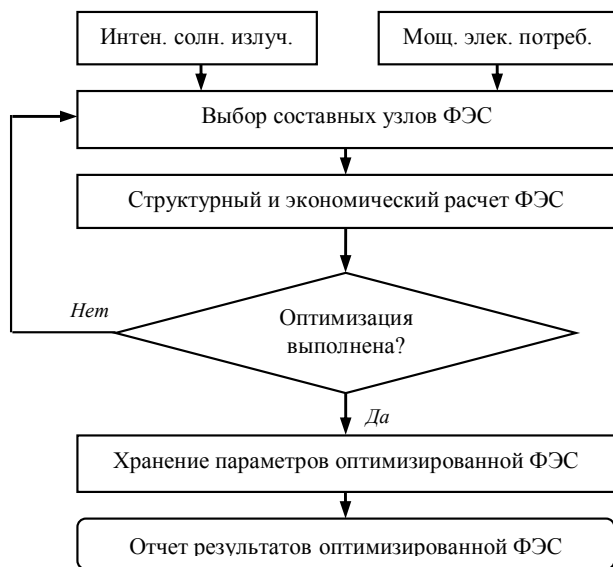


Рис. 1. Блок-схема обобщенного алгоритма проектирования ФЭС

Последовательность выполнения шагов обобщенного алгоритма проектирования ФЭС следующая:

1. Из географической базы данных местностей выбирается среднеедневное или среднегодовое значение интенсивности солнечного излучения.

2. Производится расчет электрических нагрузок, т.е. рассчитывается дневное значение или суммарной мощности, или суммарного тока потребляемых электрических нагрузок.
3. Из соответствующих баз данных производителей моделей составных узлов (фотопреобразователей, аккумуляторов, контроллеров заряда, инверторов тока) ФЭС выбираются необходимые модели.
4. Производится расчет количества выбранных моделей составных узлов ФЭС.
5. На основе полученных результатов производится экономический расчет, согласно которому определяется себестоимость проектируемой ФЭС.
6. Выполняется оптимизация возможных вариантов ФЭС, из которых выбирается ФЭС с наименьшей себестоимостью, и в конце выдаются все результаты оптимизации.

Проектирование и оптимизация ФЭС с помощью программного средства SPVSYSTEM. Для автоматизированного проектирования ФЭС как автономного режима работы, так и соединяющихся с общей сетью электроснабжения в разработанной компьютерной программе SPVSYSTEM предусмотрены соответствующие диалоговые окна выбора режима оптимизации ФЭС (рис. 2 а, б).

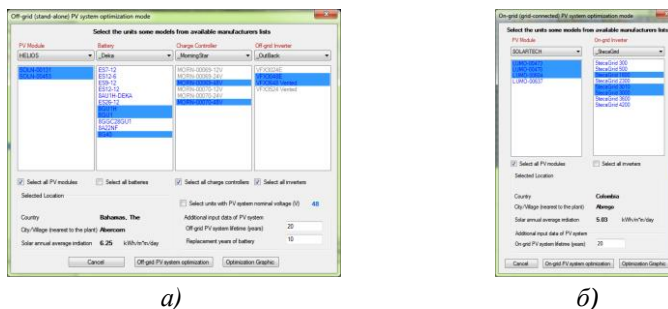


Рис. 2. Диалоговое окно выбора режима оптимизации ФЭС: а- автономного режима работы, б- соединяющихся с общей сетью электроснабжения

В диалоговом окне выбора режима оптимизации ФЭС дается возможность выбора произвольного количества моделей из соответствующих баз данных производителей составных узлов ФЭС. При нажатии соответствующих Off-grid PV system optimization или On-grid PV system optimization кнопок из выбранных моделей составных узлов ФЭС (рис. 2 а, б) составляются всевозможные комбинации ФЭС. Однако при каждой комбинации ФЭС учитывается, что количество моделей соответствующих составных узлов ФЭС не должно превышать единицу ($n_{PV} = 1, n_{Bat} = 1, n_{Ch} = 1, n_{Inv} = 1$), т.е. решаются частные случаи задач (2), (3) и (4), (5). В качестве входных данных также учитываются эксплуатационные сроки ФЭС и электрических аккумуляторов заряда (рис. 2 а, б). В результате

выполнения оптимизаций выдаются диаграмма и список оптимизированных комбинаций ФЭС (рис. 3 а, б). Из всего списка оптимизированных вариантов выделяется строка оптимизированной комбинации ФЭС с наименьшей себестоимостью. В итоге в рабочем окне представления электрических межсоединений составных узлов ФЭС программы SPVSYSTEM выводится принципиальная схема оптимизированной ФЭС с наименьшей себестоимостью (рис. 4 а, б).

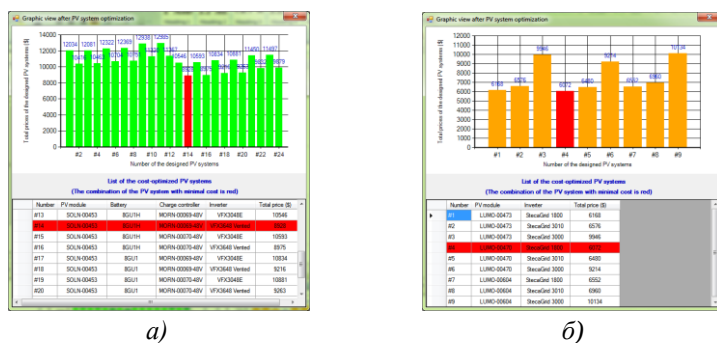


Рис. 3. Диалоговое окно просмотра результатов оптимизированных вариантов ФЭС: а- автономного режима работы, б- соединяющихся с общей сетью электроснабжения

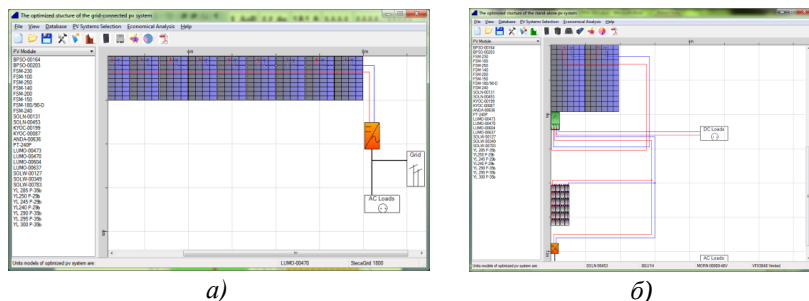


Рис. 4. Рабочее окно представления принципиальной схемы электрических межсоединений ФЭС: а- автономного режима работы, б- соединяющихся с общей сетью электроснабжения

Программа SPVSYSTEM также дает возможность получить отчетный файл результатов в формате Acrobat Reader.

Заключение. С целью получения экономически выгодных ФЭС представлены математические постановки задач оптимизации ФЭС как автономного режима работы, так и соединяющихся с общей сетью электроснабжения. Решения задач оптимального распределения ресурсов ФЭС основаны на методе сечения Гомори целочисленного линейного программирования. Представлены также обобщенный алгоритм проектирования ФЭС и компьютерная программа SPVSYSTEM, предназначенная для автоматизированного проектирования экономически выгодных ФЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Варданян Л.Дж.** Технико-экономический анализ оптимизации фотоэлектрических систем // Вестник ГИУА. Серия “Моделирование, Оптимизация, Управление”. - Ереван, 2010. - Вып.13, т. 2. - С. 124-127.
2. **Vardanyan R.R.** Solar photovoltaic power plants: Supporting financial policy // Scientific World. - 2008. - №1. - P. 58-62 (in Armenian).
3. **Vardanyan L.J., Vardanyan R.R.** Optimization and automated design of photovoltaic systems // Proceedings of the ninth international conference “SEMICONDUCTOR MICRO- AND NANO-ELECTRONICS.” - Armenia, Yerevan, May 24-26, 2013. - P. 22-24.
4. Линейное программирование в современных задачах оптимизации / **Ю.В. Бородакий, А.М. Загребасев, Н.А. Крицына и др.** - М.: МИФИ, 2008. -188 с.
5. **Схрейвер А.** Теория линейного и целочисленного программирования. Том 1. - М.: Мир, 1991. -360 с.
6. **Վարդանյան Լ.Զ.** Ֆոտոէլեկտրական համակարգերի նախագծման իմիտացիոն մոդելավորման նկարագրությունը // ՀՊՀՀ ԼՐԱԲԵԴ. Գիտ. և մեթ. հոդվածների ժողովածու. - 2011. - Հ.3, №1. - էջ 267-271:
7. **Վարդանյան Լ.Զ.** Ֆոտոէլեկտրական համակարգերի կառուցվածքի օպտիմալացման մեթոդը // ՀՊՀՀ ԼՐԱԲԵԴ. Գիտ. և մեթ. հոդվածների ժողովածու. - 2010. - Հ.2, №1. - էջ 305-309:
8. **Варданян Л.Дж.** Метод оптимизации структур фотоэлектрических систем // Вестник ГИУА. Серия “Моделирование, Оптимизация, Управление”. - Ереван, 2009. - Вып. 12, т. 2. - С. 108-114.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 22.09.2013.

Լ.Զ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ SPVSYSTEM ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ՄԻՋՈՑԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Դիտարկված են ավտոնոմ ու ռեժիմում աշխատող և ընդհանուր էլեկտրասնուցման ցանցին միացվող ֆոտոէլեկտրական համակարգերի (ՖԷՀ) ավտոմատացված նախագծման համար մշակված մաթեմատիկական մոդելները և ընդհանրացված ալգորիթմը: Ներկայացված է նաև SPVSYSTEM մշակված քոմպիլյութերային ծրագիրը՝ նախատեսված տնտեսապես արդյունավետ ՖԷՀ-երի ավտոմատացված նախագծման համար:

Առանցքային բաներ. տնտեսապես շահավետ ֆոտոէլեկտրական համակարգ, ավտոմատացված նախագծում, SPVSYSTEM ծրագրային միջոց:

L.J. VARDANYAN

DEVELOPING A SPVSYSTEM COMPUTER PROGRAM FOR AUTOMATED DESIGN OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Mathematical models and a generalized algorithm for automated design of photovoltaic systems (PVS) both the independently operating (stand-alone) and those connected to the nets of general power supply (grid-connected) are considered. A SPVSYSTEM computer program for automated design of efficient photovoltaic systems is introduced.

Keywords: cost-effective photovoltaic system, automated design, SPVSYSTEM computer program.