

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ  
ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ**

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ**

**Աղաբեկյան Դավիթ Վալերիի**

**ՀԵՌԱՀԱՂՈՐԴԱԿՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԱՐԵՎԱՅԻՆ  
ՍՆՈՒՑՄԱՆ ՄԻԶՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ե.12.03 - «Հեռահաղորդակցական ցանցեր, սարքավորումներ և համակարգեր»  
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական  
աստիճանի հայցման ատենախոսության

**ՄԵՂՍԱԳԻՐ**

ԵՐԵՎԱՆ 2021

---

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА  
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ**

**Агабекян Давид Валерьевич**

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ СОЛНЕЧНОГО ПИТАНИЯ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.12.03- "Телекоммуникационные сети, устройства и системы"

ЕРЕВАН 2021

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային  
պոլիտեխնիկական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝	տ.գ.թ. Գագիկ Երջանիկի Այվազյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	տ.գ.դ. Սուրիկ Խաչիկի Խուղավերդյան տ.գ.թ. Տարոն Մամվելի Հովհաննիսյան
Առաջատար կազմակերպություն՝	Երևանի կապի միջոցների գիտահետազոտական ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2021թ. ապրիլի 16-ին,  
Ժամը 14<sup>00</sup>-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046  
Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17  
մասնաշենք):

Ատենախոսությունը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքված է 2021թ. մարտի 4-ին:

046 Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.



Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան

---

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете  
Армении

Научный руководитель: к.т.н. Гагик Ерджаникович Айвазян

Официальные оппоненты: д.т.н. Сурик Хачикович Худавердян  
к.т.н. Тарон Самвелович Оганнисян

Ведущая организация: Ереванский научно-исследовательский  
институт средств связи

Защита диссертации состоится 16-го апреля 2021г. в 14<sup>00</sup> ч. на заседании  
Специализированного совета 046 - "Радиотехники и электроники",  
действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА)  
(адрес: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 4-го марта 2021 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета 046, к.т.н.



Бениамин Феликсович Бадалян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Преимуществами солнечного электропитания являются экологичность, безопасность, бесшумность, надежность, длительный срок безаварийной службы и низкие эксплуатационные затраты. С точки зрения ресурсов солнечного излучения и благоприятной инвестиционной среды, солнечная энергетика в Армении имеет большие перспективы.

В настоящее время телекоммуникационные компании интенсивно используют солнечную энергию, как наиболее надежный и экономически жизнеспособный вариант энергоснабжения. Замена в телекоммуникационных системах дизельных генераторов на солнечные станции повышает качество питания, сокращает или ликвидирует потребление дизельного топлива, решает экологические проблемы. Немаловажным фактором является непосредственное использование постоянного тока, генерируемого солнечными станциями, что позволяет снизить конверсионные потери. Однако основными причинами использования солнечной энергии в телекоммуникационных системах являются технические и финансовые проблемы их подключения к традиционным источникам энергии. Особенно это касается базовых станций сотовой связи, которые часто расположены на большом расстоянии от единой распределительной электрической сети, в труднодоступных местах (холмы, долины, леса и т.д.). Солнечное электропитание также используется для спутников связи, радиорелейных линий, ретрансляторов, навигационных систем, трансиверов, сигнальных башен и др.

Солнечное электропитание телекоммуникационных систем имеет некоторые специфические особенности, связанные с необходимостью более эффективной генерации электроэнергии и бесперебойного энергоснабжения нагрузки. Это заставляет разработчиков систем солнечного электропитания искать новые и совершенствовать известные технические решения, обеспечивающие повышение эффективности, производительности и снижение себестоимости генерируемой энергии. При этом следует максимально учитывать реальные условия эксплуатации солнечных станций, в том числе метеорологические и географические факторы, возможность нежелательного затенения солнечных модулей, необходимость удаленного постоянного контроля и т.д. Такой всесторонний подход является актуальной, но весьма трудной научно-практической задачей. К конструктивно-технологическим средствам решения указанной задачи, в частности, относятся:

- проектирование солнечных станций с учетом реальных условий эксплуатации;
- организация удаленного мониторинга солнечных станций;
- регулирование мощности солнечных станций в условиях затенения;
- обеспечение эффективности приема солнечного излучения.

Именно эти средства являются основным **предметом исследования**. При этом в диссертационной работе особое внимание уделено базовым станциям сотовой связи, на которые расходуется около 57% от общего энергоснабжения систем беспроводной связи.

Анализ литературы показывает, что проведенные в этих направлениях исследования являются недостаточны и практически не учитывают специфические особенности электропитания телекоммуникационных систем.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы является разработка эффективных средств солнечного электропитания телекоммуникационных систем в реальных условиях эксплуатации.

Для достижения намеченной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- оценка выходных характеристик солнечных станций с учетом реальных значений интенсивности солнечного излучения, температуры окружающего воздуха и скорости ветра;
- разработка системы удаленного мониторинга солнечных станций с передачей информации по технологиям беспроводной связи;
- обеспечение максимальной мощности солнечных станций в условиях неравномерного затенения модулей;
- оптимальное пространственное позиционирование светопринимающих поверхностей солнечных станций;
- уточнение параметров и выбор рационального режима солнечного электропитания базовых станций сотовой связи.

**Научная новизна.** В процессе проведения работ получены результаты, отличающиеся новизной:

1. Разработаны алгоритмы определения затененного состояния солнечных модулей и поиска точки глобальной мощности (GPP – Global Power Point).
2. Получены аналитические выражения, пригодные для инженерной оценки выходных характеристик солнечных станций на основе данных технической спецификации (паспорта) солнечных модулей.
3. Предложена методика аргументированного выбора параметров и рационального круглогодичного режима солнечного электропитания базовых станций сотовой связи в реальных условиях эксплуатации.
4. Разработаны светочувствительные датчики одноосного и двухосного слежения за положением Солнца на основе кремниевых солнечных элементов.
5. Разработан и опробован алгоритм управления поворотным устройством солнечной станции в режиме дискретного позиционирования.

**Практическая ценность работы.** Результаты исследований и предложенные технические решения могут способствовать проектированию и эксплуатации солнечных электростанций, и, как следствие, их широкому использованию в различных отраслях экономики, особенно для электропитания базовых станций сотовой связи.

Полученные результаты использованы в учебных курсах кафедры "Системы связи" и лаборатории фундаментальных исследований "Фотоэлектрические устройства в системе оптической связи" НПУА, а также в учебнике «Электроснабжение телекоммуникационных устройств».

Некоторые результаты диссертационной работы включены в научно-прикладной проект "Разработка методов и технологий оценки энергетического воздействия на геоэкологию региона" (Комитет науки МОНКС РА, ЕАРИ2017-027, 2018-2020 гг.).

**Внедрение результатов работы.** Результаты исследований были внедрены в Инновационном центре "Барва" (Талин, Армения) для автономного солнечного электроснабжения устройств воздействия на атмосферные процессы (акустические генераторы и электрические ионизаторы).

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность рассмотренных в диссертационной работе решений подтверждена результатами расчетных и сравнительных оценок, моделирования и многочисленных экспериментальных исследований, а также актом внедрения.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Система удаленного мониторинга солнечной станции с использованием канала GSM связи и передачи SMS-сообщений в диалоговом режиме.
2. Методика и соответствующие аналитические выражения оценки выходных характеристик солнечной станции в реальных метеоусловиях.
3. Алгоритмы определения затененного состояния солнечных модулей и поиска GPP.
4. Расчетные зависимости потока солнечного излучения на светопринимающую поверхность от угла наклона, годового количества регулировки этого угла, величины шага углового перемещения и продолжительности интервала позиционирования в условиях Республики Армения.
5. Система слежения за положением Солнца с оптимальными параметрами дискретного позиционирования.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты диссертации докладывались на:

- XI Международной конференции “Semiconductor Micro- and Nanoelectronics” (Ереван, Армения, 2017 г.);
- ежегодных научных конференциях НПУА (Ереван, Армения, 2017 и 2020 гг.);
- XIII Международной конференции “Advanced Computational Engineering and Experimenting” (Афины, Греция, 2019 г.);
- XII Международной конференции “Computer Science and Information Technologies” (Ереван, Армения, 2019 г.);
- VII Международной конференции “Возобновляемые и чистые источники энергии” (Ереван, Армения, 2020 г.).

За проведенные исследования был получен грант победителя от Комитета науки МОНКЦ РА в рамках конкурса “Программа содействия исследованиям аспирантов-2018”, а в 2017 г. удостоен премии института Analysis Research & Planning for Armenia (ARPA).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано восемь научных работ и получен один патент на авторское свидетельство, список которых приводится в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 119 наименований, и акта внедрения результатов работы. Основной текст работы изложен на 125 страницах, включая 67 рисунков и 15 таблиц. Диссертация написана на армянском языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены основные требования к электропитанию телекоммуникационных систем. Показано, что солнечные электростанции служат

надежным, управляемым и эффективным способом генерирования электроэнергии для бесперебойной эксплуатации базовых станций сотовой связи, расположенных в отдаленных местах, где нет доступа к единой распределительной электросети.

Представлены специфические особенности солнечного электропитания телекоммуникационных систем, а также указаны возможные подходы и средства их учета при проектировании и эксплуатации солнечных станций. Обоснована необходимость дальнейших исследований и новых решений, важнейшими из которых являются учет реальных условий эксплуатации, организация удаленного мониторинга и обеспечение эффективности приема солнечного излучения. Особое внимание уделено вопросам регулирования мощности солнечных станций в условиях затенения, а также анализу преимуществ и ограничений современных светочувствительных датчиков слежения за положением Солнца.

Проанализированы возможности, законодательство, области применения, современное состояние и перспективы солнечной энергетики в Республике Армения. Указано, что использование солнечных станций в телекоммуникационном секторе весьма ограничено. Это в том случае, когда солнечное электроснабжение базовых станций сотовой связи имеет не только экономическое, экологическое и техническое, но и военное значение для республики. В заключение главы сформулированы постановка задачи и направления исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке системы удаленного мониторинга солнечных станций с передачей информации по технологии беспроводной связи.

Указаны преимущества и ограничения различных средств беспроводной связи (ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi, GSM/GPRS/EDGE) для данных целей. Обоснована и выбрана технология GSM-связи с передачей SMS-сообщений в режиме Duplex. Приоритетным показателем являлась дальность действия.

Разработана архитектура системы удаленного мониторинга солнечных станций с применением GSM-связи (рис.1).

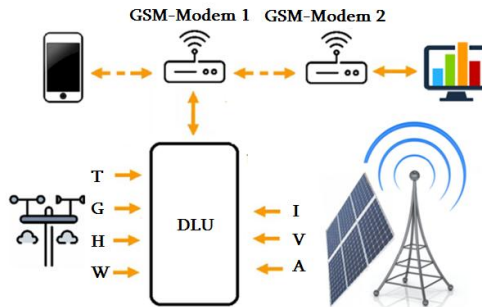


Рис. 1. Архитектура системы удаленного мониторинга солнечных станций

Значения метеорологических показателей (Т-температура, G-интенсивность излучения, W-скорость ветра, H-влажность) и электрических выходных параметров (I-ток и V-напряжение солнечной станции, A-напряжение аккумулятора), регистрируемых соответствующими датчиками, передаются в блок регистрации данных (Data Logging Unit - DLU). Последний представляет собой микроконтроллер, который передает полученную информацию в виде SMS через GSM-Modem 1

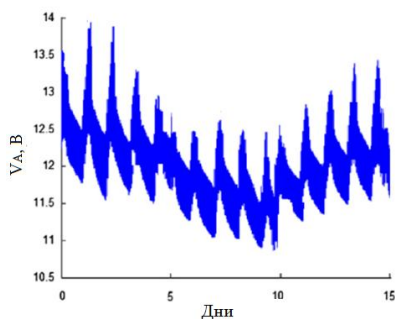
непосредственно на мобильный телефон и/или через GSM-Modem 2 на компьютер оператора. Диалоговый режим обеспечивается с помощью обратной связи. Система удаленного мониторинга легко расширяется в случае сети солнечных станций.

Микроконтроллер каждые 5 минут выходит из дежурного режима и переходит в активный режим. На его цифровые входы подаются сигналы с датчиков, регистрируются необходимые данные, рассчитывается рабочая мощность станции, оцениваются изменения мощности и интенсивности излучения, которые сравниваются с допустимыми пороговыми значениями, затем вся эта информация сохраняется в памяти. Запрос о состоянии солнечной станции выполняется автоматически с компьютера и/или мобильного телефона оператора каждые три часа, после чего формируется ответное SMS-сообщение и отправляется оператору. В случае, когда значение хотя бы одного контролируемого параметра выходит за пределы допустимого диапазона, включается GSM-Modem 1 и в режиме реального времени передает тревожное уведомление. Текущее состояние на экране компьютера отображается в виде графических изображений. Кроме того, создается архивный файл, в котором записываются метеорологические и электрические показатели, а также данные тревожных уведомлений.

Использование микроконтроллера обусловлено его низким энергопотреблением и возможностью программно задавать любые требуемые алгоритмы работы. Был выбран микроконтроллер Atmega 64, который имеет 64 кб программной (ROM) и 4 кб оперативной (SRAM) памяти. Множество портов ввода/вывода (I/O) позволяют подключить к нему необходимое количество датчиков, с помощью которых производятся чтение и передача информации по беспроводному каналу. Были использованы метеорологические и электрические цифровые датчики с I<sup>2</sup>C интерфейсом. Микроконтроллер был запрограммирован в среде Embedded C.

Для работы в сотовой сети были использованы модемы F2003, подключаемые через RS-232 интерфейс к управляющему микроконтроллеру и компьютеру. Данный модем работает на частотах 900 и 1800 МГц, обеспечивает прием и передачу SMS-сообщений. Взаимодействие с модемами выполняется с помощью AT-команд.

Изготовленный прототип системы мониторинга был успешно апробирован для обеспечения удаленного доступа к измерительным приборам и мониторинга работы солнечной станции Инновационного центра “Барва” (Талин, Армения). В качестве иллюстрации на рис. 2 показаны результаты контроля напряжения аккумулятора станции за 15-дневный период.



*Рис. 2. Результаты контроля напряжения аккумулятора солнечной станции за 15-дневный период*

Система удаленного мониторинга была использована для обнаружения затененного состояния солнечных модулей на основе непропорциональных изменений мощности ( $P_m$ ) и интенсивности излучения ( $G$ ) при двух последовательных измерениях ( $k, k - 1$ ). Разработан соответствующий алгоритм (рис. 3), согласно которому затененное состояние подтверждается (Flag Alarm=1), когда снижение мощности ( $\Delta P$ ) солнечной станции составляет более чем 10% при уменьшении солнечного излучения ( $\Delta G$ ) менее чем на 7%. Об обнаружении затененного состояния в режиме реального времени оператору передается соответствующее тревожное уведомление (SMS P\_Alarm).

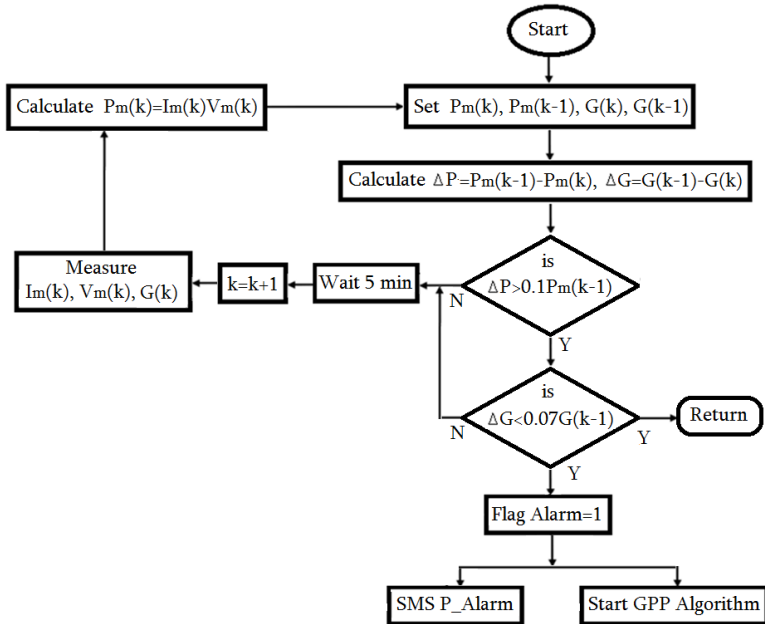


Рис. 3. Блок-схема алгоритма обнаружения затененного состояния солнечных модулей

В условиях затенения солнечных модулей на их вольт-ваттных характеристиках образуются два или более максимума, один из которых является точкой глобальной мощности (GPP), а остальные – локальные (LPP). Предложен алгоритм поиска GPP, который запускается, когда подтверждается затененное состояние (Start GPP Algorithm). Алгоритм сканирует весь диапазон напряжения по производной мощности, находит все LPP, сравнивает мощности в них и подтверждает область GPP. Затем в этой области с небольшими возмущениями начинается поиск GPP по стандартному алгоритму. Алгоритм поиска GPP работает независимо от количества и местоположения LPP на вольт-ваттных характеристиках.

Тестирование разработанных алгоритмов проводилось на солнечной станции “Барва” путем искусственного затенения трех или шести солнечных модулей с помощью матовой кальки, что изменяет вид вольт-ваттной характеристики солнечной станции с I на II или III (рис. 4). Значения выходной мощности солнечной



станции без и с применением разработанных алгоритмов представлены в таблице. Видно, что поиск GPP может способствовать увеличению мощности станции более чем на 80% в условиях неравномерного затенения модулей.

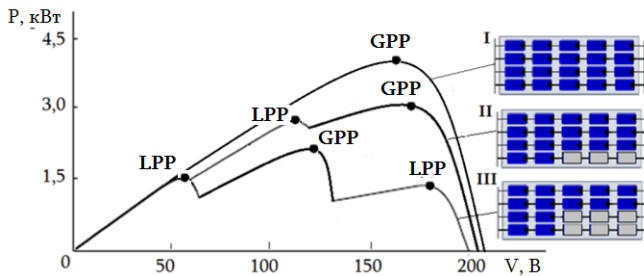


Рис. 4. Вольт-ваттные характеристики солнечной станции в условиях неравномерного затенения модулей

Таблица

Выходная мощность солнечной станции без и с применением разработанных алгоритмов

Функционирование солнечной станции	Вид вольт-ваттной характеристики и точка рабочей мощности		
	I	II	III
Без алгоритмов поиска	LPP 3,89 кВт	GPP 3,08 кВт	LPP 1,32 кВт
С алгоритмами поиска	-	GPP 3,08 кВт	GPP 2,45 кВт

**В третьей главе** обоснован учет реальных условий эксплуатации (метеорологические и географические факторы, наихудший сезон работы, пространственное позиционирование) солнечных станций для телекоммуникационных систем на этапе проектирования.

Предложена методика оценки выходных характеристик солнечных станций в реальных условиях температуры окружающего воздуха, интенсивности солнечного излучения и скорости ветра.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) солнечного модуля определяется выражением

$$I_M = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp \left( \frac{q V_M N_p + q R_s I_M N_s}{n k T_c N_s N_p} \right) - 1 \right] - \frac{V_M N_p + R_s I_M N_s}{R_{sh} N_s}, \quad (1)$$

где  $I_M$  - ток;  $V_M$  - напряжение;  $I_{ph}$  - фототок;  $I_0$  - обратный ток насыщения;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T_c$  - абсолютная температура;  $q$  - заряд электрона;  $n$  - фактор диода;  $R_s$  и  $R_{sh}$  соответственно последовательное и параллельное (шунтирующее) сопротивления;  $N_p$  и  $N_s$  - соответственно количество параллельно и последовательно соединенных солнечных элементов в модуле.

Неизвестные параметры  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $n$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  в выражении (1) определяются по паспортным значениям напряжения холостого хода ( $V_{Moc}$ ), тока короткого замыкания

( $I_{Msc}$ ), напряжения и тока в точке максимальной мощности ( $V_{Mm}$  и  $I_{Mm}$ ), температурного коэффициента тока ( $\alpha_T$ ).

Получены аналитические выражения, пригодные для инженерной оценки указанных неизвестных параметров. При этом исходными были следующие условия: в точке короткого замыкания -  $I_M = I_{Msc}$ ,  $V_m = 0$ ; в точке напряжения холостого хода -  $V_m = V_{Moc}$ ,  $I_M = 0$ ; в точке максимальной мощности -  $I_M = I_{Mm}$ ,  $V_m = V_{Mm}$  и  $dP_{Mm}/dV_{Mm} = 0$ .

В технической спецификации производителя значения параметров  $V_{Moc}$ ,  $I_{Msc}$ ,  $V_{Mm}$ ,  $I_{Mm}$ ,  $\alpha_T$  представляются в стандартных условиях тестирования (Standard Test Conditions –STC), а именно, освещенность -  $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$ , температура модуля -  $T = 25^\circ\text{C}$ , скорость ветра -  $W = 0$ .

Для учета реальных метеоусловий необходимо проводить перерасчет параметров по следующим формулам:

$$I_{phR} = \frac{G_R}{G_{STC}} [I_{phSTC} + \alpha_T(T_R - T_{STC})]; \quad (2)$$

$$I_{0R} = I_{0STC} \left( \frac{T_R}{T_{STC}} \right)^3 \exp \left( \frac{E_{gSTC}}{kT_{STC}} - \frac{E_{gR}}{kT_R} \right); \quad (3)$$

$$R_{shR} \approx \frac{G_R}{G_{STC}} R_{shSTC}; \quad n_R \approx n_{STC} \approx 1,2; \quad R_{sR} \approx R_{sSTC}, \quad (4)$$

где  $E_{gR}$  – ширина запрещенной зоны кремния; подстрочным индексом “STC” обозначены параметры по тестовым условиям, а подстрочным индексом “R” – по реальным условиям.

Предложено следующее эмпирическое уравнение для оценки температуры солнечного модуля в условиях Армении:

$$T_R = 0,951T_{amb} + 0,0198G_R - 1,462W_R + 0,3471, \quad (5)$$

где  $T_{amb}$ ,  $G_R$  и  $W_R$  – соответственно температура окружающего воздуха, интенсивность солнечного излучения и скорость ветра в месте размещения солнечной станции.

Таким образом, для оценки выходных характеристик солнечных станций с учетом реальных метеоусловий определяются значения параметров солнечных модулей  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $n$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  по полученным аналитическим выражениям, проводится их перерасчет по формулам (2)-(5), а затем оцениваются ток, напряжения и мощность исходя из выражения ВАХ (1). По количеству модулей и схеме их соединения (параллельная, последовательная, смешанная) определяются выходные параметры солнечной станции. В частности, мощность определяется по формуле

$$P_{PV} = P_{MmR} N_M = I_{MmR} V_{MmR} N_M,$$

где  $N_M$  – количество солнечных модулей.

Имитационное моделирование разработанной методики реализовано в программной среде MatLab-Simulink. На рис. 5 представлены главная Simulink-модель для определения ВАХ по формуле (1) и модель подсистемы для расчета фототока по формуле (2). Показано, что, в частности, игнорирование разницы  $15...20^\circ\text{C}$  в температурах по тестовым и реальным условиям приводит к погрешностям оценки  $7...10\%$  реальной мощности солнечной станции в  $7...10\%$ .

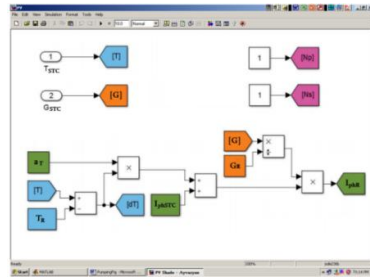
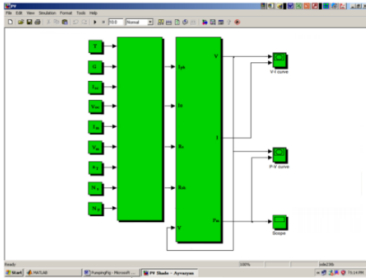


Рис. 5. Главная Simulink-модель для определения ВАХ (левый рисунок) и модель подсистемы для расчета фототока (правый рисунок)

Анализ влияния географического фактора и пространственного позиционирования на выходную мощность солнечных станций проводили с помощью тригонометрического соотношения для расчета потока солнечного излучения на наклонную светопринимающую поверхность:

$$G_T = G_{dir} \frac{\cos \xi}{\cos \theta} + G_{diff} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho(G_{dir} + G_{diff}) \frac{(1 - \cos \beta)}{2},$$

где  $G_{dir}$  и  $G_{diff}$  - соответственно значения потока прямого и диффузионного (рассеянного) солнечного излучения на горизонтальную светопринимающую поверхность;  $\beta$  - угол наклона поверхности;  $\theta$  - зенитный угол Солнца;  $\xi$  - угол между направлением потока солнечного излучения к поверхности и нормалью к ней;  $\rho$  - альbedo земной поверхности.

На основе многолетних метеоданных  $G_{dir}$  и  $G_{diff}$  определены месячные оптимальные углы наклона светопринимающих поверхностей в условиях Республики Армения (рис. 6). Для годового, летнего и зимнего полугодов предпочтительные их значения составляют 34°, 26° и 57° соответственно. Рассмотрены возможные способы пространственного позиционирования светопринимающих поверхностей: неподвижный и наклонный под оптимальным углом, с одноосным и двухосным слежением за Солнцем. Показано, что слежение за Солнцем увеличивает годовой поток солнечного излучения на 30...45% по сравнению с неподвижными поверхностями (рис. 7).

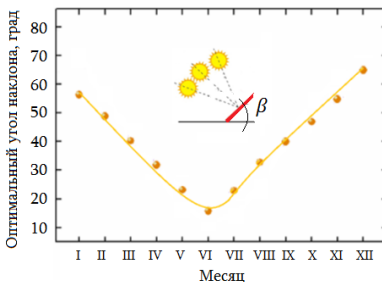


Рис. 6. Месячные оптимальные углы наклона светопринимающих поверхностей

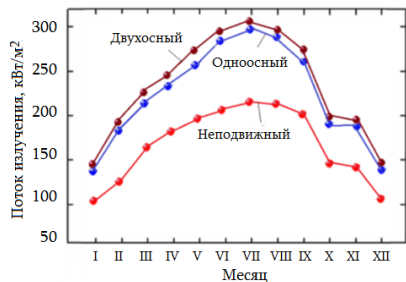


Рис. 7. Поток солнечного излучения при различных способах позиционирования

Получены зависимости потока солнечного излучения на светопринимающую поверхность от количества регулировки угла наклона в течение года, величин шага углового перемещения и продолжительности интервала позиционирования.

Предложена архитектура солнечного электропитания базовых станций сотовой связи (рис. 8). Генерируемая солнечными модулями 1 энергия подается на блок управления 2, в котором интегрированы контроллер заряда, преобразователь тока, регулятор мощности и электронный узел слежения за Солнцем. Сформированные напряжения подаются нагрузкам постоянного и переменного токов 3 базовой станции сотовой связи 4. Избыток электроэнергии накапливается в аккумуляторных батареях 5 и используется по мере необходимости. Контроль метеорологических показателей и электрических выходных параметров, а также исправности компонентов солнечной станции осуществляется системой мониторинга 6.

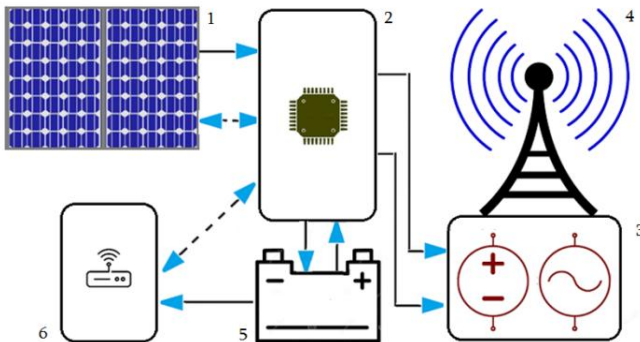


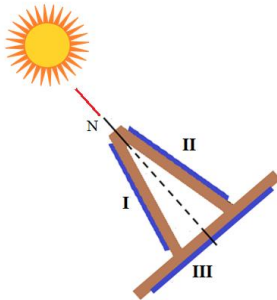
Рис. 8. Архитектура солнечного электропитания базовых мобильных станций

На основе проведенных оценок предложена методика проектирования системы солнечного электропитания базовых станций сотовой связи с минимальной возможностью «вероятности сброса нагрузки» (Loss of Load Probability). Ключевым моментом методики является учет среднесуточного энергопотребления, наихудшего годового сезона (месяца) солнечного излучения, потерь мощности за весь гарантийный период эксплуатации, дополнительной мощности на питание узлов самой солнечной системы, емкости аккумуляторов для обеспечения автономного функционирования базовой станции в определенный период. Методика продемонстрирована для базовых станций различного стандарта (2G, 3G - Node B, 4G - eNode B).

Предложенная методика обеспечивает возможность аргументированного выбора рационального круглогодичного режима солнечного электропитания базовых станций сотовой связи, требуемой емкости аккумуляторов, установленной мощности и номинального напряжения солнечных модулей, способа и параметров позиционирования. На примере конкретной базовой станции показано, что в условиях Армении предпочтительно использовать одноосное азимутное слежение за положением Солнца с углом наклона солнечных модулей  $56^\circ$ , максимальной величиной шага углового перемещения  $6^\circ$  и продолжительностью интервала позиционирования  $20 \text{ мин.}$

**В четвертой главе** представлены результаты разработки системы слежения за положением Солнца, позволяющей максимально эффективно использовать поступающее солнечное излучение.

Был изготовлен светочувствительный датчик одноосного (азимутного) слежения за Солнцем (рис. 9). Датчик выполнен в виде трехгранной пирамиды, на двух наклонных боковых гранях которой размещены два солнечных элемента (I и II), а на основании - третий элемент (III). Наклон боковых граней составлял  $24^\circ$ . Солнечные элементы I и II предназначены для определения положения Солнца, а элемент III – для определения уровня фонового излучения, разворота и запуска системы утром.



*Рис. 9. Структура светочувствительного датчика*

Кремниевые солнечные элементы имели идентичные электрофизические параметры, а в качестве регулирующего сигнала был выбран фототок солнечных элементов. Данный параметр, в отличие от напряжения, относительно сильно зависит от интенсивности солнечного излучения и практически не зависит от температуры. Таким образом, действия поворотного устройства в зависимости от величины электрического сигнала, полученного от датчика, следующие:

- $\Delta I = I_I - I_{II} > 0$  - шаговое перемещение направо;
- $\Delta I < 0$  - шаговое перемещение налево;
- $\Delta I = 0$  - перемещение отсутствует;
- $I_I, I_{II} < I_{III}$  - разворот на восток в начальное положение.

Тестирование светочувствительного датчика показало, что по техническим характеристикам он не уступает известному зарубежному аналогу - датчику MLD (Maximum Light Detection). Чувствительность датчика составляет не меньше  $0,125^\circ$ , а главными преимуществами являются простота, автономность и необходимая для солнечных станций точность наведения.

Был разработан и запатентован аналогичный светочувствительный датчик двухосного слежения за положением Солнца в виде четырехгранной пирамиды на основе пяти кремниевых солнечных элементов. Для азимутного позиционирования используется пара противоположных солнечных элементов, а для зенитного позиционирования - вторая пара. Пятый солнечный элемент расположен на основании пирамиды и служит для разворота системы на восток в начальное положение.

Разработаны структура и принципиальная электрическая схема электронного узла слежения за положением Солнца. Для минимизации энергопотребления

поворотного устройства солнечной станции составлен алгоритм управления в режиме дискретного позиционирования (рис. 10).

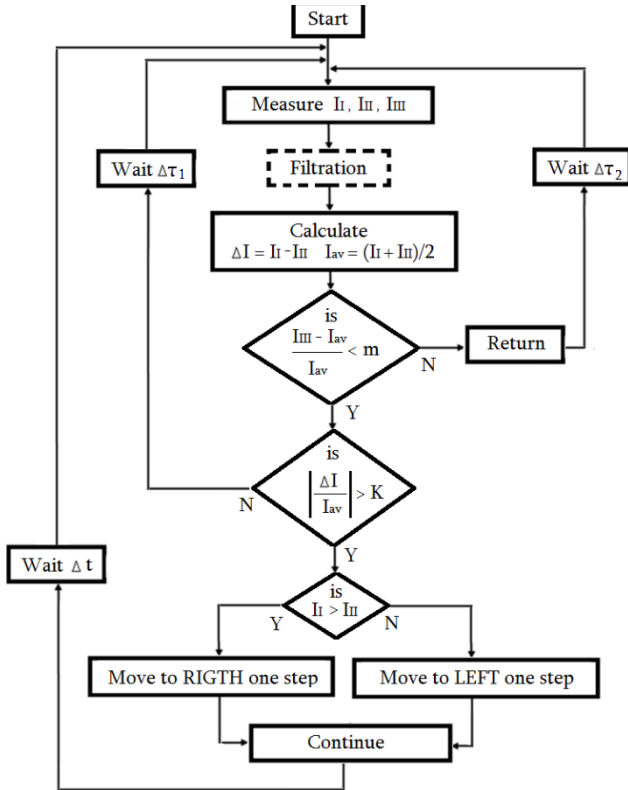


Рис. 10. Блок-схема алгоритма дискретного позиционирования

В алгоритме учтены следующие условия:

- многократное текущее измерение и фильтрация (усреднение) значений токов солнечных элементов;
- относительная величина погрешности измерения по току I и II солнечных элементов должна быть в зоне нечувствительности:

$$\left| \frac{I_I - I_{II}}{(I_I + I_{II})/2} \right| = \left| \frac{\Delta I}{I_{av}} \right| < k;$$

- относительная величина погрешности измерения по току III солнечного элемента должна быть меньше допустимого порогового значения:

$$\frac{I_{III} - (I_I + I_{II})/2}{(I_I + I_{II})/2} = \frac{I_{III} - I_{av}}{I_{av}} < m;$$

- интервал текущего позиционирования составляет  $\Delta t$ ;

- интервалы между шагами угловых перемещений при развороте и шаговыми перемещениями налево-направо составляют соответственно  $\Delta\tau_2$  и  $\Delta\tau_1$ .

Действия по разработанному алгоритму происходят следующим образом. Сначала несколько раз измеряются токи солнечных элементов ( $I_I, I_{II}, I_{III}$ ) и осуществляется усреднение (Filtration) измеренных значений. Далее определяются разница в токе I и II солнечных элементов ( $\Delta I$ ) и их среднее значение ( $I_{av}$ ), а затем находится относительная величина погрешности измерения по току III солнечного элемента  $(I_{III} - I_{av})/I_{av}$ . Если эта величина больше допустимого порогового значения  $m$ , то поворотное устройство разворачивает солнечные модули на восток в начальное положение (Return). В противном случае, определяется относительная величина погрешности измерения в токе I и II солнечных элементов  $(\Delta I/I_{av})$ , которая сравнивается с пороговым значением  $k$ . Если данная ошибка в зоне нечувствительности, то отсутствует шаговое перемещение, и в течение времени  $\Delta t$  драйверы поворотного устройства будут отключены (Wait  $\Delta t$ ). В противном случае происходит шаговое перемещение направо или налево (Move to RIGTH or LEFT one step) в зависимости от токов I и II солнечных элементов.

Микроконтроллер электронного узла управления пространственным позиционированием был запрограммирован в среде Embedded C. Обоснованы и выбраны следующие значения параметров алгоритма:  $m=0,05$ ;  $k=0,05$ ;  $\Delta t = 20$  мин;  $\Delta\tau_1 = 10$  с и  $\Delta\tau_2 = 60$  с.

Исследования в полевых условиях показали, что при использовании способа одноосного слежения дневная выработка электроэнергии солнечной станции увеличивается на 35...40% по сравнению со способом неподвижного и наклонного под оптимальным углом позиционирования (рис. 11).

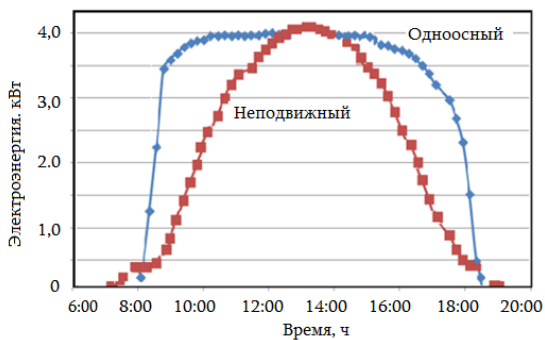


Рис. 11. Дневная выработка электроэнергии солнечной станции для двух способов позиционирования

Выполнены также исследования влияния продолжительности интервала позиционирования  $\Delta t$  на выработку электроэнергии солнечной станции и энергопотребление поворотного устройства. Показано, что выбранная продолжительность ( $\Delta t = 20$  мин) приводит к сокращению энергопотребления поворотного устройства почти в 10 раз, при этом дневная выработка электроэнергии солнечной станции уменьшается всего на 2%.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана, изготовлена и протестирована система удаленного мониторинга солнечной станции с использованием канала GSM-связи и передачи SMS-сообщений в диалоговом режиме для сбора, передачи, анализа и необходимых настроек информации о метеорологических показателях и выходных характеристиках станции [2, 7].
2. Для регулирования мощности солнечных станций разработаны алгоритмы определения затененного состояния солнечных модулей и поиска GPP. Затененное состояние подтверждается системой мониторинга на основе непропорциональных изменений выходной мощности станции и интенсивности излучения при двух последовательных измерениях. Поиск области GPP выполняется по производной мощности сканированием всего диапазона напряжений, а затем в этой области устанавливается GPP с использованием стандартных алгоритмов [6, 8].
3. Экспериментально показано, что применение предложенных алгоритмов регулирования мощности может способствовать увеличению мощности солнечной станции более чем на 80% в условиях неравномерного затенения солнечных модулей [8].
4. Предложена методика оценки выходных характеристик солнечной станции в реальных метеоусловиях на основе паспортных данных солнечных модулей и выведены соответствующие аналитические выражения для инженерных расчетов. Имитационным моделированием в MatLab-Simulink показано, что игнорирование разницы  $15...20^{\circ}\text{C}$  в температурах по тестовым и реальным условиям приводит к 7...10% погрешностям оценки реальной мощности солнечной станции [9].
5. На основе теоретических расчетов определены предпочтительные углы наклона светопринимающих поверхностей по отношению к горизонтальной плоскости в условиях Республики Армения (на примере г. Талин). Получены зависимости потока солнечного излучения на светопринимающую поверхность от количества регулировки угла наклона в течение года, величины шага углового перемещения и продолжительности интервала позиционирования.
6. Предложена методика аргументированного выбора параметров и рационального круглогодичного режима солнечного электропитания базовых станций сотовой связи. В условиях Армении предпочтительно использовать азимутное слежение за положением Солнца с углом наклона солнечных модулей  $56^{\circ}$  и продолжительностью интервала позиционирования 20 мин [5].
7. Разработаны светочувствительные датчики и электронный узел системы слежения за положением Солнца. Составлен и протестирован алгоритм управления поворотным устройством солнечной станции в режиме дискретного позиционирования [1, 3, 4].
8. Показано, что система слежения за положением Солнца по техническим характеристикам не уступает известному зарубежному аналогу. Применение интервала позиционирования приводит к сокращению энергопотребления поворотного устройства в несколько раз, при этом дневная выработка электроэнергии уменьшается незначительно [5].



**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. ՀՀ Գյուտի Արտոնագիր 3272A. Արևային կայանների արևի շարժմանը հետևող լուսազգայուն տվիչ / Գ.Ե. Այվազյան, Կ.Գ. Այվազյան, Դ.Վ. Աղաբեկյան, Լ.Ս. Լախոյան. - 2017:
2. Ayvazyan A.G., Aghabekyan D.V., Vardanyan A.A. Remote Monitoring System using GSM for Photovoltaic Stations // Proc. of 11th Int. Conf. on Semiconductor Micro- and Nanoelectronics.- Yerevan, Armenia, 2017.- P. 153-156.
3. Այվազյան Կ.Գ., Աղաբեկյան Դ.Վ., Աղդալյան Վ.Յու. Արևին հետևող լուսազգայուն տվիչ // ՀՃԱ-ի Լրաբեր. - 2017.- Ն. 14, № 2.- էջ 290-293:
4. Աղաբեկյան Դ.Վ. Արևին երկառնանցք հետևող լուսազգայուն տվիչ // ՀՃԱ-ի Լրաբեր. - 2017.- Ն. 14, № 3.- էջ 488-490:
5. Айвазян Г.Е., Агабекян Д.В., Варданын А.А., Петросян О.А. Система отслеживания за солнцем для фотовольтаических станций // Вестник НПУА: Сборник научных статей. – Ереван, 2018. - Часть 1. – С. 160-165.
6. Aghabekyan D.V., Ayvazyan G.Y. Shade-Tolerant Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Systems // Abstracts Book of 13th Int. Conf. on Advanced Computational Engineering and Experimenting, 2019.- P. 125-126.
7. Aghabekyan D.V. GSM-Based Control System for Photovoltaic Stations // Proc. of the 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Computer Science and Information Technologies.- Yerevan, Armenia, 2019.- P. 215-217.
8. Այվազյան Գ.Ե., Այվազյան Կ.Գ., Աղաբեկյան Դ.Վ., Լախոյան Լ.Ս. Արևային կայանների առավելագույն հզորության կարգավորումը // ՀՃԱ-ի Լրաբեր. – 2020.- Ն. 17, №1. – էջ 94-99:
9. Այվազյան Գ.Ե., Աղաբեկյան Դ.Վ. Արևային մոդուլների հզորության գնահատումը շահագործման իրական պայմաններում // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա.- 2020.- Ն. LXXIII, № 1.- էջ 37-46:

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Արևային սնուցումն ունի մի շարք առավելություններ. անձայն է, էկոլոգիապես մաքուր, հուսալի, անվտանգ, ունի անխափան աշխատանքի մեծ ժամանակ և շահագործման փոքր ծախսեր: Արևային ճառագայթային էներգիայի ռեսուրսների և ներդրումային բարենպաստ միջավայրի տեսակետից արևային էներգետիկան Հայաստանի Հանրապետությունում ունի մեծ հեռանկար:

Ներկայումս հեռահաղորդակցման ընկերություններն ակտիվորեն կիրառում են արևի էներգիան որպես հուսալի և տնտեսապես շահավետ էներգիայի աղբյուր: Հեռահաղորդակցման համակարգերում դիգեյլային գեներատորների փոխարինումը արևային կայաններով բարելավում է էլեկտրաէներգիայի մատակարարման որակը, նվազեցնում է դիգեյլային վառելիքի օգտագործումը, լուծում է բնապահպանական խնդիրներ: Կարևոր գործոն է նաև արևային կայաններով գեներացված հաստատուն հոսանքի անմիջական օգտագործումը, ինչը թույլ է տալիս փոքրացնել փոխակերպման կորուստները:

Սակայն հեռահաղորդակցման համակարգերի համար արևային սնուցման կիրառումը հիմնականում պայմանավորված է էլեկտրասնուցման ավանդական աղբյուրներին դրանց միանալու տեխնիկական ու ֆինանսական խնդիրներով: Անվաճը վերաբերվում է հատկապես բջջային ցանցի բազային կայաններին, որոնք հաճախ տեղակայվում են համընդհանուր/միացյալ էլեկտրական ցանցից մեծ հեռավորության վրա, դժվար հասանելի տեղանքներում (բարձունքներ, դաշտավայրեր, անտառներ և այլն): Արևային սնուցումը կիրառվում է նաև հեռահաղորդակցման այլ համակարգերի համար, այդ թվում ռադիոկապի արբանյակներ, ռադիոռելեյային և միկրոալիքային գծեր, լուսաազդանշանային աշտարակներ, տերմինալներ, տրանսիվերներ, ընդունիչներ և այլն:

Հեռահաղորդակցման համակարգերի արևային սնուցումը ունի մի շարք առանձնահատկություններ՝ պայմանավորված էներգիայի առավել արդյունավետ գեներացմամբ և էլեկտրական բեռնվածքի ամբողջական ծածկման ռեժիմի ապահովմամբ: Դա նշանակում է, որ անհրաժեշտ է առավելագույնս հաշվի առնել արևային կայանների շահագործման իրական պայմանները (օդերևութաբանական և աշխարհագրական գործոններ, ստվերի առկայություն, հեռահար հսկման անհրաժեշտություն և այլն): Այդպիսի համալիր մոտեցումն արդիական և միևնույն ժամանակ դժվարագույն խնդիր է:

Ատենախոսության նպատակն էր մշակել շահագործման իրական պայմաններում հեռահաղորդակցման համակարգերի արդյունավետ արևային սնուցման միջոցներ:

Հետազոտության հիմնական արդյունքները հետևյալն են.

- Մշակվել, պատրաստվել և փորձարկվել է GSM կապի կիրառմամբ և երկխոսության ռեժիմում SMS հրահանգների փոխանցմամբ արևային կայանի հեռահար մոնիթորինգի համակարգ:
- Մշակվել են արևային մոդուլների ստվերված վիճակի հաստատման և այդ պայմաններում գլոբալ հզորության կետի որոնման ալգորիթմներ, որոնց

կիրառումն կարող է նպաստել արևային կայանի ելքային հզորության մեծացմանն ավելի քան 80%-ով՝ անհավասարաչափ ստվերման պայմաններում:

- Առաջարկվել է արևային մոդուլների անձնագրային պարամետրերի հիման վրա օդերևութաբանական իրական պայմաններում արևային կայանի ելքային բնութագրերի գնահատման ընթացակարգ և արտածվել են ինժեներական հաշվարկների համար համապատասխան անալիտիկ արտահայտություններ: MatLab-Simulink իմիտացիոն մոդելավորմամբ ցույց է տրվել, որ շրջապատի իրական և թեսթային պայմանների ջերմաստիճանների 15...20°C տարբերության անտեսումը հանգեցնում է արևային կայանի աշխատանքային հզորության գնահատման 7...10% սխալանքի:
- Տեսական հաշվարկների հիման վրա որոշվել են ՀՀ պայմանների համար (ք. Թալինի օրինակով) լուսաընդունիչ մակերևույթների հորիզոնական հարթության նկատմամբ թեքության նախընտրելի անկյունները, վերլուծվել են արևային ճառագայթման հոսքի փոփոխությունները՝ կախված տարվա ընթացքում թեքության անկյան կարգավորումների քանակից, անկյունային տեղաշարժի քայլի մեծությունից և կողմնորոշման դադարի տևողությունից:
- Առաջարկվել է բջջային ցանցի բազային կայանների արևային սնուցման պարամետրերի և շուրջտարյա ռացիոնալ ռեժիմի հիմնավորված ընտրության ընթացակարգ: Հայաստանի պայմաններում արևային կայանների համար նախընտրելի է 56° թեքության անկյամբ արևին ազիմուտային հետևումը 20 րոպե կողմնորոշման դադարի տևողությամբ:
- Մշակվել են արևին հետևող համակարգի լուսազգայուն տվիչներ և էլեկտրոնային կառավարման հանգույցը: Կազմվել և փորձարկվել է արևային կայանի պտտող սարքակազմին դիսկրետ կողմնորոշման ռեժիմում կառավարման ալգորիթմ:
- Ցույց է տրվել, որ արևին հետևող համակարգը տեխնիկական բնութագրերով չի զիջում արտասահմանյան արտադրության լավագույն անալոգներին: Տեղաշարժի դադարի կիրառումը հանգեցնում է պտտող սարքակազմի էլեկտրաէներգիայի ծախսի նվազեցմանը մի քանի անգամ՝ արևային կայանով գեներացված էլեկտրաէներգիայի աննշան փոքրացման պայմաններում:

## DAVIT VALERI AGHABEKYAN

### DEVELOPING SOLAR POWER MEANS OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS

#### SUMMARY

The advantages of solar power supply are environmental friendliness, safety, noiselessness, reliability, long service life, low operating costs. In terms of solar radiation resources and a favorable investment environment, solar energy in Armenia has great prospects.

At present telecommunication companies actively apply solar energy as a reliable and economically viable energy source. Replacement of diesel generators by solar stations improves the quality of electricity supply, reduces the use of diesel fuel, and solves environmental problems. An important factor is the direct use of DC generated by solar stations, which allows reducing conversion losses. However, the main reasons for using solar energy in telecommunication systems are the technical and financial problems of their connection to traditional energy sources. This is especially true for mobile base stations, which are often located at a great distance from the unified electric network, in hard-to-reach places (hills, valleys, forests, etc.). Solar power is also used for other systems of telecommunication, including radio communication satellites, radio relay lines, microwave lines, terminals, transceivers, receivers, navigation systems, signal towers, etc.

Solar power supply of telecommunication systems has some specific features conditioned by a more efficient energy generation and provision of uninterrupted power supply to the load. This forces the developers of solar power means to look for new and improve the known technical solutions that increase the efficiency, productivity and reduce the cost of the generated energy. It means that, it is necessary to take into account the actual operating conditions of solar stations, including meteorological and geographical factors, the possibility of unwanted shading of solar modules, the need for remote permanent monitoring, etc. Such a comprehensive approach is an urgent, important and difficult problem at the same time.

The aim of the dissertation is to develop effective solar power means of telecommunication systems in real operating conditions.

The main results of the research are as follows:

- A GSM-based remote monitoring system of solar station by sending SMS commands in the duplex mode has been developed, prepared and tested
- Algorithms for the detection of the shaded state of the solar modules and for tracking the global power point has been developed, the use of which can increase the output power of the solar station by more than 80% under the uneven shaded conditions.
- A procedure for estimating the output characteristics of the solar station in real meteorological conditions on the basis of the passport data of solar modules has been designed, the corresponding analytical expressions for engineering calculations have been derived. MatLab-Simulink simulation modeling has shown that ignoring the

difference of 15...20°C in temperatures for standard test and real conditions leads to 7...10% errors in estimating the real power of solar stations.

- The preferred tilt angles of the light-receiving surfaces with respect to the horizontal plane in the conditions of Republic of Armenia (at the example of the city Talin) have been determined. The dependences of the solar radiation flux on the light-receiving surface on the amount of tilt angle adjustment during the year, the step size of the angular movement and the duration of the positioning interval have been analyzed.
- A procedure for a reasoned choice of the parameters and rational year-round operation mode of solar power supply for mobile stations has been proposed. In the conditions of Armenia, it is preferable to use azimuth solar tracking with tilt angle of solar modules of 56° and positioning interval duration of 20 *min*.
- Photosensitive sensors and an electronic unit for the system has been developed. The control algorithm of the solar station rotary device in the discrete positioning mode has been compiled and tested.
- It has been shown that the solar tracking system is not inferior in technical characteristics to the well-known foreign analogues. The use of the positioning interval leads to a several-fold reduction in the power consumption of the rotary device, while the daily power generation of the solar station decreases slightly.

