

Проектирование СД установок дорожного освещения, работающих на солнечной энергии¹

Д. ПЭРДАХДЖИ¹, Х. ЁЗКАН²

¹ Университет Коджаэли, Коджаэли (Измит), Турция

² Компания *Litpa Lighting*, Стамбул, Турция

E-mail: perdahci@kocaeli.edu.tr, hamdizkan@litpa.com

Аннотация

Турция богата возобновляемыми источниками энергии и поэтому поощряет использование экобезопасных систем дорожного освещения. В наше время на смену НЛВД, МГЛ и др. традиционным ИС пришли СД ИС, экономящие энергию и финансовые средства. Объединение солнечной энергоустановки с СД ИС для уличного освещения способствует повышению экономии энергии и качества освещения на местном уровне.

Конструктивно светильники с СД другие, чем – с традиционными ИС, и поэтому оптическая, теплотехническая и электрическая стороны их проектирования тоже другие. В связи с этим в настоящей работе пристальное внимание уделено вопросам проектирования и принципу работы светильников с СД для дорожного освещения. Кроме того, была спроектирована простая ОУ с СД и солнечной панелью и сравнены экономические показатели последней (автономное питание) и ОУ с СД, питаемой от электросети, после 20 лет их эксплуатации.

Ключевые слова: светильник с СД на солнечной энергии, дорожное освещение, энергосбережение.

1. Введение

Согласно оценкам, объём энергопотребления на освещение парков, садов и дорог высок и поэтому энергосбережение в этих местах жизненно важно. Обеспечение равенства освещения при меньшем энергопотреблении без ущерба для качества первого и использование более эффективных светильников плюс достижение хороших условий освещения и создают экономию энергии в освещении. Необходимость этого вызвала большой рост

использования возобновляемой энергии. Энергия, получаемая от Солнца, стала одним из главных видов энергии во многих применениях [1]. Из-за удобства выбора солнечных панелей для разных целей, их применения в неэлектрифицированных средах обитания и их интеграции в существующие конструкции применение солнечных панелей (являющееся способом получения возобновляемой энергии) в ОУ быстро расширилось [2]. Многими исследованиями подтверждено, что ОУ с СД экономически целесообразны, энергоэффективны и сдерживают выбросы CO_2 [3–9].

В наше время, благодаря достижениям в освещении, используемые во многих областях ОУ с СД пригодны для получения инновационных и устаревших светотехнических решений для парковых, садовых и дорожных зон. Применение светильников с СД с большим сроком службы, лучшей цветопередачей, более простой светорегулировкой и меньшими эксплуатационными расходами, чем у традиционных светильников, – это одна из энергоэффективных технологий последних лет. Благодаря её постоянному развитию световая отдача СД всё больше растёт, и применение СД ИС в дорожном освещении растёт день ото дня [3].

Диоды из полупроводниковых материалов излучают при прохождении

через них тока и генерируют ток под действием излучения. При приложении к нему напряжения диодный ИС начинает излучать в соответствующих спектральных участках ИК, видимого или УФ оптических диапазонов [10, 11].

Солнечную энергию преобразуют в электрическую фотоэлектрические (ФЭ) модули (солнечные панели). Фотоны от Солнца передают свою энергию $p-n$ -переходам в ФЭ ячейках этих полупроводниковых модулей, что вызывает движение электронов, порождающее электрический ток. Последний может непосредственно использоваться как прямой ток при подключении нагрузки между контактами ФЭ ячеек [2], или преобразовываться в переменный, или же сохраняться для последующего использования [10].

С учётом характеристик солнечной радиации в Стамбуле, особенно в зимнее время, очень низкие уровни вырабатываемой электроэнергии дают очень низкие уровни световой энергии. Поэтому в расчёте на питание от солнечной панели мы создали светильник с СД малой мощности.

2. Описание комплектующих светильника с СД на солнечной энергии

Мы спроектировали и произвели светильник с СД на солнечной энергии (СЭ) для пешеходных дорожек, парков и садов (рис. 1). Мы можем выпускать модели мощностью 33, 45 и 67 Вт (не больше, т.к. они рассчитаны на работу на СЭ). Разработанный светильник подходит и для дорог категорий $M3$ и $M4$. Мы подготовили также производственно-техническую базу производства светильников для улиц дорожной категории $M2$ и находимся на стадии проектирования этих светильников.

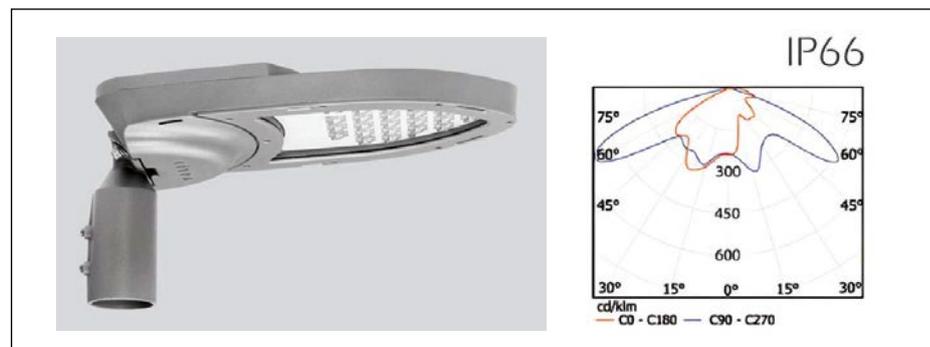


Рис. 1. Светильник с СД на солнечной энергии *LITPA LYS20/DC*

¹ Перевод с англ. С.Г. Ашуркова

Кроме того, мы планируем разработку такого типа светильников и для дорог категории *M1*. Мы задумали ОУ на СЭ с датчиком движения и разными уровнями снижения яркости, способный программировать себя саму в ночное время. Именно поэтому нам хочется быть уверенными в том, что аккумуляторные батареи (АКБ), которые мы используем, долговечней и компактней других. На следующем этапе работ мы планируем дополнить светильники «солнечной» и интеллектуальной программой автоматизации. Помимо этого, датчик движения будет снижать уровень пониженной яркости в отсутствие в нём необходимости.

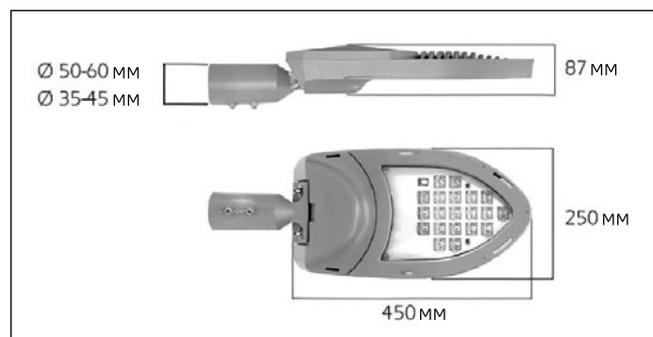
С учётом особенностей данной ОУ мы не использовали в ней стандартные рыночные управляющие устройства («драйверы»). В нашей «солнечной» электронной плате мы использовали модуль токовой стабилизации, диод, 2- и 3-штырьковые выводы, 6-штырьковый соединительный кабель и 6-штырьковый соединитель.

Для получения энергоэффективных решений по освещению пешеходных дорожек, парков, садов и дорог необходимо в уличных светильниках с СД использовать СД ИС с высокой световой отдачей. Предпочтительно СД сборки 3535 компаний *Lumileds*, *Nichia* и *Samsung*. Световая отдача светильника – 130 лм/Вт и выше. Благодаря отсутствию преобразования прямой т./переменный т. и потерь в управляющих устройствах мы хотим получить световую отдачу светильника в 160 лм/Вт. При этом световой поток светильника (размеры в плане: 450 × 250 мм) регулируется (в зависимости от уровня естественного освещения), составляя в максимуме 8000 лм (рис. 2).

Для эффективного рассеяния тепла и охлаждения в светильнике использована алюминиевая печатная плата. Желательно, чтобы коэффициент теплопроводности её был не меньше 1,1 Вт/(м·К). На печатной плате установлен 21 СДК (рис. 3). Кабели присоединяются к печатной плате с помощью имеющиеся у них соединителей.

Для оптимального освещения дорог и улиц мы использовали асимметричные линзы «для уличного освещения», минимизирующие уровни затенения и блёскости. В случае фиксированных угловых осветительных опор и консолей угловое положение светового пучка

Рис. 2. Размеры светильника по рис. 1



ка нерегулируемое. Однако мы обеспечили регулируемость направления пучка с помощью некоторого соединительного элемента.

При выборе конструкции корпуса светильника учитывалось то, что гарантия высоких срока службы и световой отдачи СД обеспечиваются охлаждающими каналами на корпусе. Последний изготавливается из алюминия литьём под давлением и является коррозионноустойчивым. Кроме того, корпус окрашен полиэфирной электростатической порошковой краской, что делает его весьма долговечным и нержавеющим. Между задней крышкой и корпусом светильника вставлена уплотнительная прокладка. Подобные же прокладки установлены между защитным стеклом и корпусом. Необходимо, чтобы соединительные винты были из нержавеющей стали, а стекло было закалённым.

Выпускаемые нами светильники имеют степень защиты оболочки *IP66*, подходящую для наружных применений.

Вместо управляющего устройства в нашем светильнике с СД на СЭ мы спроектировали плату пост.т./пост.т., которая может работать и с 12-, и с 24-вольтовыми ОУ.

Химические материалы в данном светильнике – кремниевые линзы (на СД), клеи для скрепления этой линз с печатной платой, термомолента

или термопаста (для лучшей теплопроводности между печатной платой и корпусом) и прокладочные материалы для защиты оболочки светильника, содержащие летучие органические соединения. При использовании химически изменчивых органических соединений на или около СД, которые не совместимы с СД, светильник повреждается и срок службы используемых СД и, соответственно, светильника с ними падает.

3. Проектирование светильника с СД на солнечной энергии для дорожного освещения

В этом параграфе описываются шаги по разработке дорожного светильника с СД на СЭ – проектирование светильника, изготовление прототипов, проектирование электронной части, проектирование механической части и тестирование рабочих характеристик светильника.

• Проектирование светильника

Вначале нашим проектно-техническим отделом был выполнен исследовательский этап проекта, который касался техники применения СД в освещении и выпускаемой СД продукции. Эти глубокие и систематические исследования создали информационную базу по проектированию и применению этой продукции (по живым и литературным источникам) и позволили

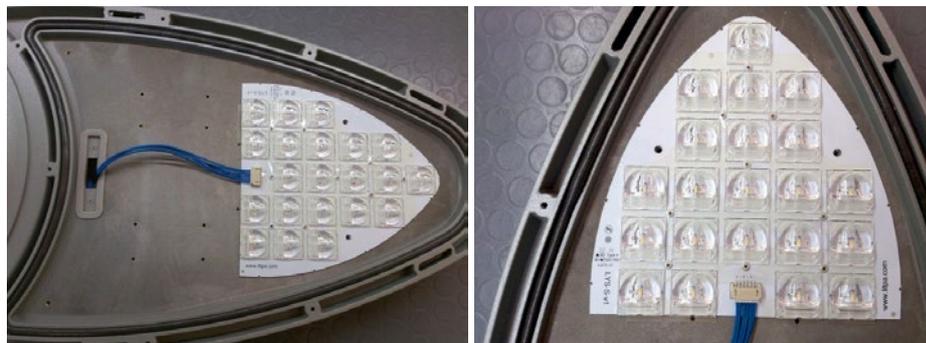


Рис. 3. СД модуль (на печатной плате) светильника по рис. 1

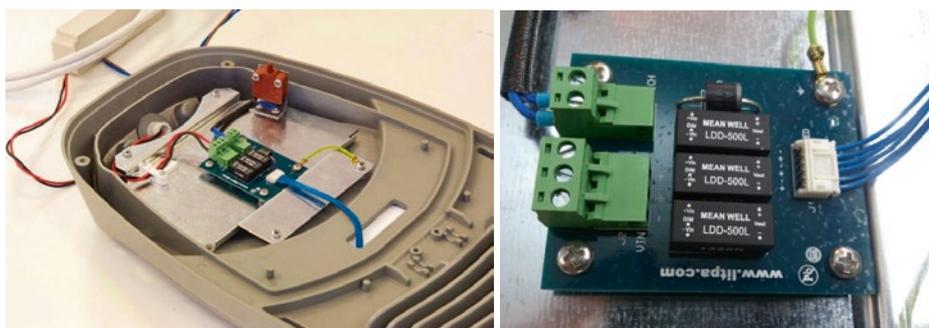


Рис. 4. Электронная плата светильника по рис. 1

сформулировать общие технические требования к светильникам.

Проектно-исследовательские работы по проектированию светильников включают проектирование уличного светильника с СД, изготовление и тестирование его лабораторных образцов, а также определение полного энергопотребления светильников и эффективность освещения. Выборы типа СД, количества и схемы их расстановки в светильниках производятся в соответствии с требуемыми оптическими и теплотехническими параметрами. Детальное проектирование оптимального СД осуществляется в компьютерной программной среде с учётом технологических, эстетических, эргономических и механических аспектов. Выполняется оптическое и тепловое моделирование проектируемых светильников (наш проект был проверен в программной среде до начала детального проектирования и создания чертежей).

- *Изготовление прототипов*

На этом этапе в 3D-проектной программной среде получают технологические чертежи компонентов светильника. В данном проекте используется пакет программ для автоматизированного 3D-проектирования, и каждая деталь и литейные формы моделируются в программной среде. Детальный проект светильника направляется в опытное производ-

во, и после тестирования частей полученных образцов проектируются литейные формы для каждой детали (с учётом пределов возможностей литейных форм и соответствующих компаний-поставщиков).

- *Проектирование электронной части*

Печатная плата как ИС (СД модуль) светильника содержит 3 параллельно соединённых СД цепочки по 7 СД в каждой (всего 21 СД). Каждая параллельная цепочка имеет свой индивидуальный стабилизатор тока, конструкция которого зависит от выбранного значения тока СД. Мы выбрали стабилизаторы тока на: 350 мА для получения мощности 22 Вт; 500 мА – 33 Вт и 700 мА – 48 Вт. Мы также применили в схеме диод, защищающий от обратной полярности, чтобы устранить риск переполновки АКБ. Наши модули стабилизации тока питаются от АКБ на 24 В, что достаточно для питания всех СД светильника (рис. 4).

Наибольшее достоинство разработанной нами печатной платы состоит в том, что контроллер ОУ может поставлять энергию от АКБ непосредственно в светильник. Поэтому использование в светильнике классических управляющих устройств стало излишним. Преобразователь перем.т./пост.т. при этом не нужен, и ОУ работает намного эффективнее от преобразователя пост.т./пост.т.

Печатная плата выполнена из алюминия толщиной 1,6 мм с коэффициентом теплопроводности 1,1 Вт/(м·К). Кабельные соединения осуществляются через соединители на печатной плате с СД. СД и соединители на плате автоматически упорядочены по времени включения/выключения и контролируются по качеству работы.

- *Проектирование механической части*

Светильник как целое проектируется, смотря по приоритетности его оптической и тепловой сторон. Монтажные кронштейны светильников можно выполнять так, чтобы они подходили для установки светильников и на опорах, и на консолях с углом наклона до 15° с шагом ± 5°. По соображениям стабильности теплового режима оптимизируется масса конструкции. Светильник удобен в установке и креплении, и его эргономичность облегчит техническое обслуживание. При этом техобслуживание электрических соединений электронной платы можно производить, открывая заднюю крышку, не касаясь СД-части светильника.

- *Проверки рабочих характеристик ОУ с СД на СЭ*

Изготовленные прототипы светильника вначале проходили проверки вида продукции и рабочих характеристик на гониофотометрической установке в лаборатории компании *Litpa Lighting* (рис. 5), а затем – соответствия знаку «СЕ» в независимых испытательных лабораториях. Показатели качества светильников промышленного производства – вроде устойчивости к условиям окружающей среды и стоимости эксплуатации (энергопотребление, простота в техобслуживании, запчасти и т.д.) – для потребителя крайне важны, и их проверки по соответствующим стандартам проводились тщательным образом. Кроме того, будут проверены уровень энергопотребления и рабочие световые характеристики полнокомплектной ОУ с СД на СЭ с внесением возможных конструктивных улучшений.

4. Проектирование дорожной ОУ с СД на солнечной энергии

Традиционные ОУ с СД, питаемые от сети, устроены намного проще ОУ с СД на СЭ, у которых также выше, чем у первых, начальная стоимость и стоимость техобслуживания мно-

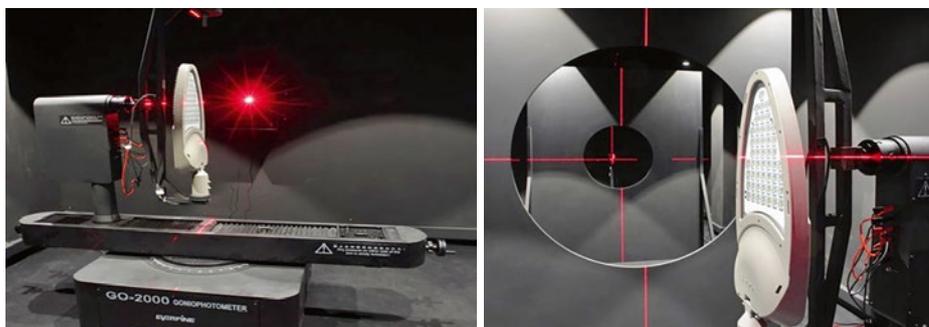


Рис. 5. Измерение характеристик светильника по рис. 1

Расчётные характеристики солнечной панели

Месяц	Дневная сумма солнечной радиации, кВт·ч/м ²	Тангенс угла наклона солнечной панели	КПД солнечной панели	Площадь солнечной панели, м ²	Суточная выработка электроэнергии, кВт·ч
1	2	1,15	0,167	1,64	0,629924
2	2,57				0,809452
3	4,2				1,32284
4	5,28				1,662999
5	6,3				1,984261
6	6,79				2,138592
7	6,79				2,138592
8	6,07				1,911819
9	5,09				1,603157
10	3,74				1,177958
11	2,37				0,74646
12	1,8				0,566932

гих их компонентов. Поэтому ОУ на СЭ имеют ограниченное применение в осветительной практике. Однако путём комплексного планирования процессов разработки найти ниши для успешного применения ОУ с СД на СЭ реально можно [12].

На рис. 6 приведена блок-схема проектной единичной ОУ, содержащей солнечную панель, светильник с СД для дорожного освещения, контроллер заряда (типа *MPPT*) и АКБ. Принцип (фотоэлектрический) её работы можно описать так: солнечная панель получает солнечное излучение (в течение дня); энергия этого излучения с использованием контроллера заряда и разряда преобразуется в электрическую; электрическая энергия хранится в АКБ, являющейся местом хранения электроэнергии в дневное время; когда АКБ полностью заряжена блок заряда это обнаруживает, прекращает зарядку АКБ и поддерживает готовность ОУ к использованию; в ночное время солнечная энергия, хранящаяся в АКБ, высвобождается для питания ОУ и зажигает уличный светильник. При этом последний функционирует стабильно, поскольку АКБ обычно соответствует требованиям к ней по напряжению и току.

Эксперимент проводился в Стамбуле и выявил множество параметров, определяющих эффективность работы ОУ на СЭ. Результаты эксперимента обобщены в табл. 1. В ней указаны

значения параметров для расчёта суточной выработки электроэнергии.

Определение суточной выработки электроэнергии – особо важная часть проектирования несетевых фотоэлектрических устройств. Мы определяли фотоэлектрическую энергию

по суточной потребности в ней у потребителя.

В 2-х первых столбцах табл. 1 находятся основанные на данных [13] (рис. 7) дневная сумма солнечной радиации (кВт·ч/м²) и тангенс угла наклона солнечной панели. Считается,

Рис. 6. Блок-схема единичной ОУ (со светильником по рис. 1)

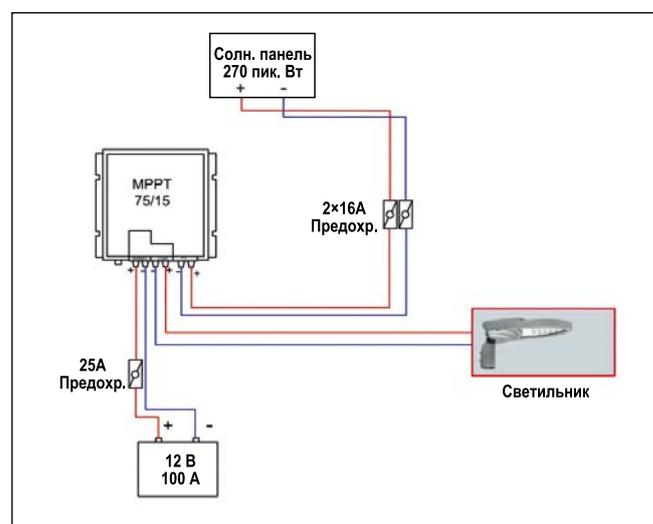


Рис. 7. Значения суммы дневной солнечной радиации в Стамбуле, кВт·ч/м²

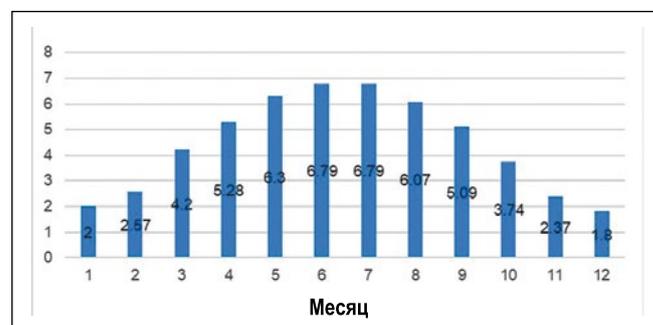


Таблица 2

Параметры солнечной панели (компания *TotmaTech*) при стандартных тестовых условиях [15]

Номинальная (максимальная) мощность P_{max}	TT275-60P
Напряжение холостого хода V_{oc} , В	37,30
Ток короткого замыкания I_{sc} , А	9,20
Напряжение номинальной мощности V_{mp} , В	31,3
Ток номинальной мощности I_{mp} , А	8,78
Количество солнечных ячеек (размеры ячеек, мм)	60 (156 × 156)
Размеры, мм	1640 × 990 × 35
Вес, кг	19
Максимальная мощность ОУ, Вт	1000 (пост.т.)
Максимальный номинальный ток предохранителя, А	15
Рабочая температура, °С	от -40 до +85 °С

что для Стамбула он равен 1,15. (Это расчётное значение соответствует декабрю на широте 40°11', на которой находится Стамбул.)

По каталожным данным для солнечной панели типа *TT275-60W*, приведённым в табл. 2, может быть рассчитан (по электрическим параметрам) её КПД при облучённости 1000 Вт/м². При такой облучённости и номинальной вырабатываемой удельной мощности 275 Вт/м² КПД солнечной панели с размерами 1640 × 990 × 35 мм получается равным 16 %.

Суточную выработку электроэнергии (кВт·ч) рассчитывают перемножением значений дневной суммы солнечной радиации, тангенса угла наклона, КПД и площади солнечной панели.

Солнечная панель, которая в декабре вырабатывает по 0,56 кВт ч электроэнергии в сутки соответствует нашей суточной потребности в 0,42 кВт ч. Поэтому панель типа *TT275-60W* пригодна для рассматриваемой ОУ.

Далее – несколько несложных расчётов и выкладок.

$$P_{pv} = \frac{E(L)}{\eta(s) \cdot PSH} S_f$$

$$P_{pv} = \frac{48 \text{ Вт} \cdot 9 \text{ ч}}{0,9 \cdot 2,1 \text{ ч}} \cdot 1,2,$$

$$P_{pv} = 274,28 \text{ Вт},$$

где S_f – коэффициент запаса мощности, P_{pv} – мощность панели, $E(L)$ – суточное энергопотребление, $\eta(s)$ – КПД ОУ, PSH – пиковые солнце-часы.

$$C_{wh} = \frac{E(L) \cdot a(t)}{DOD \cdot \eta(c) \cdot V_b},$$

$$C_{wh} = \frac{(48 \cdot 9) \cdot 1}{0,5 \cdot 0,95 \cdot 12},$$

$$C_{wh} = 75,79 \text{ А} \cdot \text{ч},$$

где $a(t)$ – количество дней автономной работы АКБ, DOD – глубина разряда АКБ, $\eta(c)$ – КПД АКБ, V_b – напряжение АКБ, C_{wh} – ёмкость АКБ.

Параметры контроллера заряда (ММРТ):

$$V_{in} = V_{oc} \text{ панели} = 37,3 \text{ В},$$

$$I_{in} = I_{sc} \text{ панели} = 9,20 \text{ А},$$

V_{out} = напряжению заряда АКБ = (12–14,4) В,

$$I_{out} = \frac{P_p \cdot \eta_{\text{зарядного устройства}}}{\text{Зарядное напряжение}},$$

$$I_{out} = 18,14 \text{ А} [16].$$

Таким образом расчётным путём были выбраны следующие значения параметров ОУ (рис. 6), при коэффициенте запаса 1,2: длительность энергопотребления в сутки – 9 ч; мощность СД ИС – 48 Вт; КПД ОУ – 0,9 и пиковые солнце-часы – 2,1 ч. Соответственно, была получена удельная мощность солнечной панели – 274,38 Вт/м². При расчёте ёмкости АКБ принималось время автономной работы в 1 сутки. КПД АКБ – 0,95, напряжение АКБ – 12 В и глубина разряда АКБ – 0,5. В результате имеем следующее: ёмкость АКБ – 75,79 А·ч, $V_{oc} = 37,3$ В и $I_{sc} = 9,20$ А, а выбранное значение I_{out} определялось параметрами применяемого контроллера заряда *MPPT 75/15* и составляло 18,14 А.

Некоторые дополнительные заявленные характеристики солнечной панели приведены на рис. 9 и 10.

5. Расчёты по яркости проезжей части

Вследствие того, что зрительные работоспособность и комфорт пользователей дорожного освещения зависят от таких измеряемых параметров, как яркость и освещённость дорожного полотна, требования к установкам

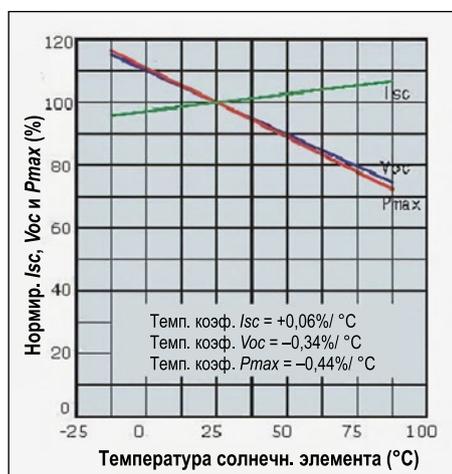


Рис. 8. Температурная зависимость тока короткого замыкания I_{sc} , напряжения холостого хода V_{oc} и номинальной (максимальной) мощности P_{max} [15]

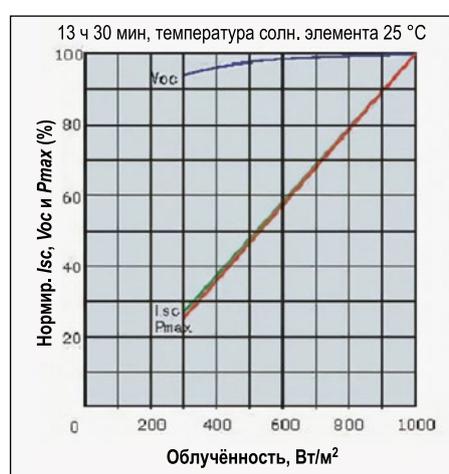


Рис. 9. Зависимость от облучённости тока короткого замыкания I_{sc} , напряжения холостого хода V_{oc} и номинальной (максимальной) мощности P_{max} [15]

Капитальные затраты на единичную дорожную ОУ с СД на солнечной энергии типа *LYS20-DC*

№	Компонент	Модель	Количество	Единица измерения	Стоимость, \$	Итоговая стоимость, \$
1	Солнечная панель	270	1	шт.	87,00	87,00
2	Светильник для дорожного освещения	48W			113,50	113,50
3	АКБ «Gel 12V»	100Ah			140,00	140,00
4	Солнечный контроллер заряда	MPPT 75/15			90,00	90,00
5	Таймер				30,00	30,00
6	Осветительная опора	4m			200,00	200,00
7	Медный кабель 4 × 2,5 мм ²		50	м	1,00	50,00
8	Стоимость монтажа		1	шт.	400,00	400,00
9	Панель с плавкими предохранителями				100,00	100,00
						1210,50

Таблица 4

Капитальные затраты на единичную дорожную ОУ с СД с сетевым питанием типа *LYS20-AC*

№	Компонент	Модель	Количество	Единица измерения	Стоимость, \$	Итоговая стоимость, \$
1	Светильник для дорожного освещения	52W	1	шт.	108,00	108,00
2	Осветительная опора	4m	1		165,00	165,00
3	Медный кабель 4 × 6 мм ²		50	м	1,00	50,00
4	Стоимость монтажа		1		400,00	400,00
5	Панель с плавкими предохранителями		1	шт.	100,00	100,00
						823,00

дорожного освещения должны учитывать этот аспект [14].

В настоящей работе изучались показатели качества дорожного освещения светильниками с СД (48 Вт) на СЭ на 300-метровом участке проез-

жей части дороги с двумя полосами движения. При этом светильники на опорах устанавливались по обе стороны дороги с шагом в 8 м. Для сравнения расчётных значений освещённости с требуемыми по евростандарту

EN13201 применялось моделирование в «*Dialux*» (рис. 10).

На рис. 11 приведён пример расчётных распределений яркости и освещённости дорог, соответствующих требованиям стандарта *EN13201* для дорог класса «*ME4a*».

Рис. 10. Расчётные значения освещённости

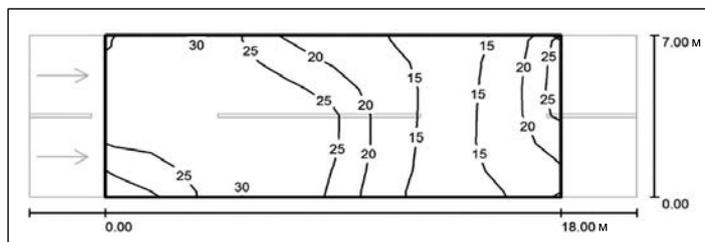


Рис. 11. Пример представления расчётных данных

Maintenance factor: 0.90		Scale 1:172				
Gnd: 10 x 6 Points						
Accompanying Street Elements: Roadway 1.						
tarmac: R4, q0: 0.080						
Selected Lighting Class: ME4a (All lighting performance requirements are met.)						
Calculated values:	L _{av} [cd/m ²]	U0	U1	TI [%]	SR	
Required values according to class:	≥ 0.75	≥ 0.40	≥ 0.60	≤ 15	≥ 0.50	
Fulfilled/Not fulfilled:	✓	✓	✓	✓	✓	

7. Экономический анализ освещения светодиодами при питании от сети и от солнечной батареи

В настоящей работе исследовался вопрос экономической целесообразности уличного (дорожного) освещения светильниками с СД (48 Вт) на СЭ на 300-метровом отрезке шоссе с 2-мя полосами движения. Проводилось экономическое сравнение двух видов уличного освещения светильниками с СД – с электросетевым и с фотоэлектрическим питанием. Ка-

Капитальные затраты и расходы на обслуживание единичной дорожной ОУ с СД с сетевым питанием типа LYS20-AC за 20 лет эксплуатации

№	Компонент	Модель	Количество	Единица измерения	Стоимость, \$	Итоговая стоимость, \$
1	Светильник для дорожного освещения	52W	2	шт.	108,00	216,00
2	Осветительная опора	4m	1		300,00	300,00
3	Медный кабель 4 × 6 мм ²		50	м	3,90	195,00
4	Стоимость монтажа		1		400,00	400,00
5	Панель с плавкими предохранителями		1	шт.	100,00	100,00
						1211,00

Таблица 7

Стоимостной анализ ОУ LYS20-AC и LYS20-DC после 20 лет их эксплуатации при включении по 12 ч в сутки

Дорожная ОУ типа LYS20-AC						
Стоимость ОУ, \$	Общая потребляемая мощность, Вт	Продолжительность включения освещения 12 ч × 30 дн. × 12 мес. × 20 лет	Стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч	Общее энергопотребление, кВт·ч	Общие затраты на энергию, \$	Итоговая стоимость ОУ после 20 лет эксплуатации, \$
1211,00	52	86400	0,30	4492,8	1.347,84	2558,84

Дорожная ОУ типа LYS20-DC						
Стоимость ОУ, \$	Общая потребляемая мощность, Вт	Продолжительность включения освещения 12 ч × 30 дн. × 12 мес. × 20 лет	Стоимость электроэнергии, \$	Общее энергопотребление, кВт·ч	Общие затраты на энергию, \$	Итоговая стоимость ОУ после 20 лет эксплуатации, \$
1564,00	48	86400	-	4147,2	-	1564,00

ждая единичная ОУ «суммарной» ОУ с СД для уличного освещения, работающей на СЭ, содержит фотоэлектрический модуль (солнечную панель) мощностью 270 пиковых Вт (т.е. максимум 270 Вт при ярком солнце), АКБ 12 В/100 А·ч и светильник с СД мощностью 48 Вт.

Из табл. 3 и 4 видно, что капитальные затраты на единичные ОУ с СД с питанием от сети и от солнечной панели, соответственно, равны \$823,00 и \$1210,00.

В табл. 5 и 6 приведены оценки капитальных затрат и расходов на техобслуживание сравниваемых видов единичных ОУ за 20-летний период эксплуатации, а в табл. 7 – оценки сумм капитальных и эксплуатационных затрат и расходов на техническое обслуживание обоих видов сравниваемых единичных ОУ за 20 лет их эксплуатации. В нашем же использовалось 38 единичных ОУ (и, соответственно, 38 осветительных опор) с расстояни-

ем 8 м между ними на 300-метровом участке дороги категории «МЕ4а». Соответственно, стоимость единичной ОУ на СЭ равна \$1564, а стоимость всей («суммарной») ОУ на СЭ, с 38 единичными ОУ, – \$59432.

Стоимость единичной ОУ с СД, питаемой от электросети, равна \$2558,84, а стоимость всей ОУ с этим видом питания, с 38 единичными ОУ, – \$97235,92.

Таким образом при одинаковом в обоих случаях уровне освещения за 20 лет может быть сэкономлено \$37803,92.

8. Заключение

В настоящей статье подробно описаны и проанализированы принципы работы и вопросы проектирования предложенного варианта светильника дорожного освещения с СД на СЭ. Для проверки осуществимости предложенного нами подхода были про-

нализированы результаты расчётов по яркости дорожного полотна.

Благодаря тому, что дорожные (уличные) ОУ с СД на СЭ имеют много преимуществ перед «традиционными» они стали доступны для освещения множества всевозможных дорог и улиц. При этом светильники с СД могут легко интегрироваться в ОУ на СЭ.

Уровень СД-продукции за последнюю пару лет значительно вырос, что создаёт хорошие альтернативы «обычным» ОУ. Простота управляющих устройств (в части пускорегулирования и диммирования), повышенные срок службы и световая отдача – одни из главных преимуществ использования СД.

Кроме того, светильники с СД позволяют эффективнее управлять световым потоком, что может сберечь большой объём электроэнергии и сокращать бюджетные расходы на освещение.

Капитальные затраты и расходы на обслуживание единичной дорожной ОУ с СД на солнечной энергии типа *LYS20-DC* за 20 лет эксплуатации

№	Компонент	Модель	Количество	Единица измерения	Стоимость, \$	Итоговая стоимость, \$
1	Солнечная панель	270	1	шт.	87,00	87,00
2	Светильник для дорожного освещения (5 лет гарантии, срок службы 50000 ч)	48W	2		113,50	227,00
3	АКБ «Gel 12V»	100Ah	2		140,00	280,00
4	Солнечный контроллер заряда (5 лет гарантии)	MPPT 75/15	2		90,00	180,00
5	Таймер		2		20,00	40,00
6	Осветительная опора	4m	1		200,00	200,00
7	Медный кабель 4 × 6 мм ²		50	м	1,00	50,00
8	Стоимость монтажа		1		400,00	400,00
9	Панель с плавкими предохранителями		1	шт.	100,00	100,00
						1564,00

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить Совет научно-технических исследований Турции (*TUBITAK*) за финансирование исследовательского проекта No. 7121017 «LED Road Lighting and Automation System Design, Production and Application», которое поддерживает нашу работу. Авторы хотели бы также поблагодарить Университет Коджаэли и компанию *LITPA Lighting Co.* За их ценный вклад в данное исследование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sathya P. et al.* Design and Implementation of 12V/24V Closed loop Boost Converter for Solar Powered LED Lighting System // Int. J. Journal of Engineering and Technology (IJET). – 2013. – Vol. 5, No. 1.
- Çolak I., Sefa I., Bayindir R., Demirtas M.* Güneş Enerjisi Kaynaklı LED Armatür Tasarımı // J. of Polytechnic. – 2007. – Vol. 10, No. 4. – P. 347–352.
- Masoud M.I.* Street Lighting using Solar Powered LED Light Technology: Sultan Qaboos University Case Study / Proc. of the 8th IEEE GCC Conference and Exhibition, Muscat, Oman, 1–4 February, 2015.
- Al-Kurdia L., Al-Masria R., Al-Salaymeh A.* Economical Investigation of the Feasibility of Utilizing the PV Solar Lighting for Jordanian Streets // Int. J. of Thermal & Environmental Engineering. – 2015. – Vol. 10, No. 1. – P. 79–85.
- Ali M., Orabi M., Abdelkarim E., Abu Qahouq J.A., El Aroudi A.* Design and development of energy-free solar street LED light system / 2011 IEEE PES Conf. on Innovative Smart Grid Technologies – Middle East, Jeddah. – P. 1–7, 2011.
- Wu M.S., Huang H.H., Huang B.J., Tang C.W., Cheng C.W.* Economic feasibility of solar-powered led roadway lighting // Renewable Energy. – 2009. – Vol. 34, No. 6. – P. 1934–1938.
- Mardikaningsih I.S., Sutopo W., Hisjam M., Zakaria R.* Techno-economic Feasibility Analysis of a Public Street Light with Solar Cell Power / Proc. of the Int. Multi Conf. of Engineers and Computer Scientists 2016, Hong Kong, 2016, Vol. 2. – P. 1–5.
- Nallapaneni M.K., Anup K.S., K. Vinay K.R.* Fossil Fuel to Solar Power: A Sustainable Technical Design for Street Lighting in Fugar City, Nigeria / 6th Int. Conf. on Advances in Computing & Communications, ICACC2016, Cochin, India, P. 956–966, 2016.
- Rajab Z., Khalil A., Amhamed M., Asheibi A.* Economic Feasibility Of Solar Powered Street Lighting System In Libya / 8th IEEE International Renewable Energy Congress (IREC2017), 2017.
- Eliyi D.T., Çaylan T.* Güneş Enerjisi ve LED İle Etkin Enerji Kullanımı: Yol Aydınlatmalarına Yönelik Bir Uygulama // J. of Industrial Engineering. – 2008. – Vol. 19, No. 2. – P. 2–15.
- Pode R.* Solution to Enhance The Acceptability of Solar-Powered LED Lighting Technology // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14. – P. 1096–1103.
- Mohammed H.A.* Design and Implementation of a Photovoltaic System Used for Street LIGHTS // IEEE2nd Int. Conf. on Control Science and Systems Engineering, 2016. – P. 169–175.
- URL: <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/pages/34.aspx>.
- Van Bommel W.* Road Lighting: Fundamentals, Technology and Application. – Switzerland: Springer, 2015. – 334 p.
- URL: <https://www.tommatech.de/>.
- Kazem H.A., Khatib T.T.N., Sopian K.B.* Sizing of a standalone photovoltaic/battery system at minimum cost for remote housing electrification in Sohar, Oman // Energy and Buildings. – 2013. – Vol. 61, June. – P. 108–115.



Джанан Пэрдахджи (Sanan Perdahci), В.Е.
(1991), М. Sc. (1993) по электротехнике (Технический университет Йылдыз, Стамбул) и Ph.D. (1997) по электротехнике (Университет Коджаэли, Коджаэли). Доцент электротехнического факультета Университета Коджаэли. Область научных интересов: освещение светодиодами, качество электроэнергии, тоннельное и дорожное освещение



Хамди Ёзкан (Hamdi Özkan), В. Sc. (2003) по машиностроению (Университет Тракия, Эдирне). Ответственный специалист отдела исследований и развития компании Litpa

Lighting. Область научных интересов: проектирование механической и оптической частей светильников, спектры излучения светильников