

Технико-экономический анализ автономных установок дорожного освещения в Турции¹

А.К. ДЮМАН¹, Ё. ГЮЛЕР²

Стамбульский технический университет, Стамбул, Турция

¹ E-mail: dumanan@itu.edu.tr

² E-mail: onder.guler@itu.edu.tr

Аннотация

В работе проведён технико-экономический анализ автономных установок дорожного освещения применительно к условиям провинции Анталия, Турция. Для расчёта параметров дорожного освещения использовалась программа *DIALux*, а для моделирования, определения характеристик и оптимизации энергетических установок использовалась программа *HOMER*. Расчёты производились с целью выяснения того, какой – минимальный или максимальный – шаг между опорами является оптимальным для расположенных в Анталии осветительных установок дорог класса *M3* по освещению, работающих от фотоэлектрических источников питания при двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схемах расположения светильников. Проведён технико-экономический анализ энергетических установок в случае уменьшения мощности светильников с СД после полуночи. Так как периоды окупаемости установок оказались большими, чем их сроки службы (20 лет), как при наличии, так и при отсутствии светорегулирования, то наряду с современным вариантом были рассмотрены варианты с увеличением стоимости единицы электроэнергии и уменьшением стоимости компонентов фотоэлектрических устройств и аккумуляторов.

Ключевые слова: СД, дорожное освещение, фотоэлектрические установки, технико-экономический анализ.

1. Введение

Возобновляемые источники энергии, которые, в отличие от обычных источников энергии, не вносят вклад в выбросы парниковых газов, в последние годы получили широкую

поддержку со стороны правительств, бизнеса и потребителей. Фотоэлектрические (ФЭ) и ветроэнергетические установки относятся к наиболее конкурентоспособным возобновляемым «чистым» источникам энергии, которые могут заменить традиционные ископаемые источники энергии, обеспечив при этом уменьшение выброса CO_2 . Одним из энергопотребляющих секторов является дорожное освещение, где в последние годы большое внимание стали уделять обеспечению потребности осветительных установок (ОУ) в энергии за счёт использования автономных возобновляемых источников энергии. Этому вопросу были посвящены многочисленные исследования, затрагивающие, помимо прочего, и технико-экономическую целесообразность применения ОУ, питаемых от ФЭ источников энергии [1–5]. В современных экономических условиях, автономные ОУ целесообразны только в неэлектрифицированной сельской местности, куда линии электропередачи только предстоит провести. Однако благодаря непрерывному уменьшению стоимости светильников с СД и компонентов ФЭ установок (ФЭУ), автономные ОУ могут оказаться привлекательными и в других местах [6].

Благодаря успехам в области материалов, за последние 7 лет стоимость вырабатываемой ФЭУ энергии уменьшилась более чем на 70 %, от 1,34 \$/Вт до 0,5 \$/Вт [7, 8]. Наряду с уменьшением стоимости ФЭУ, последние достижения в области СД техники позволили перейти от традиционного освещения к энергоэффективному освещению светодиодами. Помимо своих стоимостных преимуществ, потребляющие меньше энергии светильники с СД позволили использовать имеющие меньшие размеры и поэтому более дешёвые ФЭ панели и аккумуляторы, что позволили сократить расходы на автономные ФЭ ОУ.

В данной работе проведён технико-экономический анализ автономных ФЭ ОУ с СД в условиях провинции Анталия, являющейся пятой по количеству населения провинцией Турции и туристическим центром. Анталия расположена на юге страны и характеризуется высокими уровнем и продолжительностью солнечного света. Для расчёта параметров дорожного освещения использовалась программа *DIALux*, а для моделирования, определения характеристик и оптимизации ФЭУ использовалась программа *HOMER*. В первой части работы были выполнены расчёты для выяснения того, какой – минимальный или максимальный – шаг между опорами является оптимальным для расположенных в Анталии ОУ дорог класса *M3* по освещению, работающих от ФЭ источников питания при двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схемах расположения светильников. В случае удовлетворяющих требованиям к освещению ОУ с максимальным шагом между опорами, требуются более долговечные, более высокие и, тем самым, более дорогостоящие осветительные опоры и более мощные и дорогие ФЭУ и светильники с СД. Однако при этом требуется меньшее количество опор. С другой стороны, в случае минимального шага между опорами, приходящееся на 1 км количество опор будет большим, тогда как размеры, мощность и стоимость ФЭУ, равно как и высота осветительных опор, уменьшатся. Во второй части работы применительно к полученному в первой части оптимальному решению проведён технико-экономический анализ энергосистемы в случае уменьшения мощности светильников с СД после полуночи. Светотехнические расчёты и оптимизация энергетической установки были, опять же, проведены применительно к оптимальному решению. Кроме того, наряду с современным сценарием были рассмотрены сценарии с увеличением стоимости единицы электроэнергии на 25 %, уменьшением стоимости компонентов ФЭ устройств и аккумуляторов на 25 и 50 % и с одновременным увеличением стоимости единицы электроэнергии на 25 % и уменьшением стоимости компонентов ФЭ устройств и аккумуляторов на 50 %.

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

2. Расчёты характеристик дорожного освещения

В настоящее время требования к дорожному освещению содержатся в стандартах Международной комиссии по освещению (МКО) и Европейского комитета по стандартизации (CEN) [9, 10]. В зону ответственности Турецкой энергораспределительной компании (*Turkish Electricity Distribution Co. – TEDAŞ*) входят сооружение и техническое обслуживание примерно 5 млн осветительных опор, установленных в городах и в сельской местности Турции [11]. По данным Турецкого института статистики, в 2016 г. затраты электроэнергии на общее освещение составили 4161 ГВт·ч, то есть 1,8 % от равно-го 2331204 ГВт·ч полного количества потребляемой в Турции электроэнергии [12].

Для данного исследования была выбрана дорога класса *M3* по освещению, где сравнительно мощные светильники могут использоваться без превышения предельной ёмкости аккумуляторов ФЭУ, которые могут быть смонтированы на опорах. Светотехнические расчёты характеристик дорожного освещения производились применительно к 4-полосной дороге шириной 14 м с двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схемами расположения светильников. Ширина разделительной полосы принималась равной 2 м.

Светотехнические расчёты характеристик дорожного освещения производились в соответствии с разработанными компанией *TEDAŞ* Техническими условиями на дорожные светильники с СД и Методами и основами использования светильников с СД для общего освещения, стандартом *TS EN13201-3* и Техническими условиями на дорожные светильники *TEDAŞ MYD-95-009.B* [13–16]. Требования к освещению дорог класса *M3* по освещению приведены в табл. 1. В соответствии с *CIE154:2003* [17], для класса защиты *IP66* коэффициент технического обслуживания был принят равным 0,89. Сама дорога считалась относящейся к классу *R3*.

Кривые силы света рассматривавшихся в работе светильников приведены на рис. 1.

Согласно [13], в случае дорог класса *M3* по освещению минимально допустимый шаг между опорами при

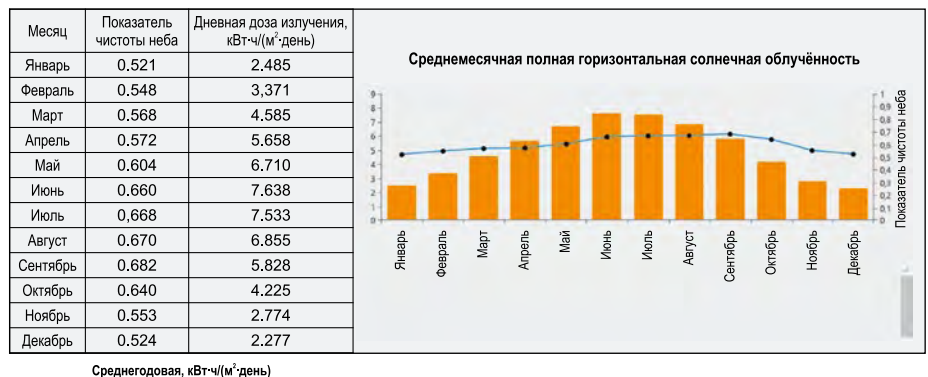
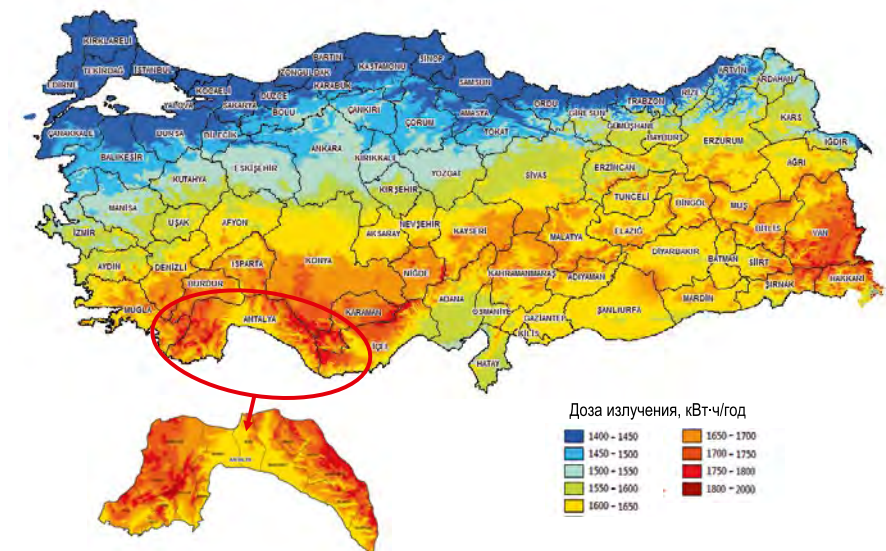


Рис. 2. Карта наличия солнечного света в Турции и данные о дозе солнечного излучения и показателе чистоты неба для Анталии

двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схемах расположения светильников составляет, соответственно, 30 и 28 м. Поэтому при расчётах в программе *DIALux* шаг между опорами изменялся, соответственно, в пределах от 30 до 55 м и от 28 до 55 м с шагом изменения 1 м, тогда как высота опор изменялась от 7 до 10 м с шагом изменения 0,5 м, а длина консоли – от 0 до 1,5 м с шагом изменения 0,5 м. Угол наклона консоли был равен 0°.

В данной работе для выявления наиболее экономически эффективной автономной ОУ для дороги класса *M3* по освещению было проведено сравнение двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схем расположения светильников. Кроме того, для определения того, какое из двух решений – с большим количеством осветительных опор и менее мощными светильниками, ФЭ панелями и аккумуляторами или с меньшим количеством осветительных опор и более мощными светильниками, ФЭ панелями

и аккумуляторами – предпочтительнее, было проведено сравнение вариантов с максимальным и минимальным шагом между опорами. Результаты расчёта освещения для дороги класса *M3* по освещению, проведённого применительно к максимальному и минимальному шагу между опорами и двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схемам расположения светильников приведены в табл. 2.

3. Расчёты

3.1. Моделирование энергетических установок

Оптимизация энергетической установки осуществлялась при помощи разработанной в Национальной лаборатории по исследованиям в области возобновляемых источников энергии (США) программы оптимизации маломощных устройств *HOMER*. Срок службы рассматриваемых энергетических установок был принят равным

Требования к характеристикам дорожного освещения для выбранного класса дороги по освещению

Класс по освещению	L_{avg} , кд/м ²	U_o	U_l	$TI, \%$	SR
<i>M3</i>	$\geq 1,0$	$\geq 0,4$	$\geq 0,5$	≤ 15	$\geq 0,5$

L_{avg} – средняя яркость; U_o – общая равномерность; U_l – продольная равномерность; TI – пороговое приращение яркости; SR – коэффициент периферийного освещения.

Таблица 2

Расчёт освещения для дороги класса *M3* по освещению

Параметр	Схема расположения светильников			
	Двухрядная центральная		Двухрядная прямоугольная	
Шаг, м	30	49	28	51
Световой поток светильника, лм	5642	9270	4641	9270
Мощность светильника, Вт	46	73	39	73
Световая отдача светильника, лм/Вт	123	127	119	127
Высота подвеса, м	8	9,5	7	10
Длина кронштейна, м	1,5	0,5	1	1
L_{avg} , кд/м ²	1,09	1,02	1,01	1,00
U_o	0,53	0,40	0,47	0,42
U_l	0,78	0,51	0,76	0,53
$TI, \%$	10	14	10	13
SR	0,76	0,89	0,61	0,85

20 лет при равной 3 % реальной процентной ставке. Т.к. потребности ОУ должны удовлетворяться на протяжении всего года, то неприемлемы никакие уменьшения мощности.

При проведении расчётов мощность ФЭ панели изменялась в диапазоне 100–855 Вт в случае двухрядной центральной и в диапазоне 100–570 Вт в случае двухрядной прямоугольной схем расположения светильников с шагом изменения 10 Вт. Срок службы панели принимался равным 20-ти годам, капитальные затраты и стоимость замены панели – равными 0,52 \$/Вт, а затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание – равными 7 \$/год. Панели были наклонены под углом 36,90°, что соответствует широте расположения рассматриваемой местности. Коэффициент снижения мощности ФЭ панели считался равным 90 %, а коэффициент отражения поверхности земли – равным 20 %. Данные о солнечном свете извлекались при помощи программы HOMER из Базы данных по метеорологии и солнечному свету НАСА. Использовались аккумуляторы с но-

минальным напряжением 12 В и номинальной ёмкостью, изменяющейся в пределах от 33,3 и 500 А·ч. Разрешался 30-процентный минимальный уровень заряженности при равной 86 % эффективности преобразования энергии. Стоимость аккумулятора изменялась в пределах от \$ 117 до \$ 997. Т.к. аккумуляторы и ФЭ панели устанавливались на одних и тех же столбах, то стоимость технического обслуживания аккумуляторов была включена в стоимость технического обслуживания ФЭ панелей.

При проведении расчётов считалось, что установки дорожного освещения работают от заката до рассвета и не работают в дневное время и во время гражданских сумерек, которые представляют собой период времени, когда угол между Солнцем и уровнем горизонта не превышает 6°, объекты различимы и люди могут заниматься повседневной деятельностью, не нуждаясь в искусственном освещении. В табл. 3 приведены помесечные данные о средней продолжительности дневного света в Анталии, причём при определении продолжительности

дневного света учитывался переход на летнее время.

В данной работе учитывался вклад автономных ФЭ СД установок дорожного освещения в экологическую безопасность, так как одна из задач ФЭ заключается в уменьшении выброса CO_2 . При расчёте уменьшения выброса CO_2 использовались данные Международного энергетического агентства, согласно которым в Турции выработка 1 кВт·ч энергии сопровождается выбросом 490 г CO_2 [18].

3.2. Результаты оптимизации, период окупаемости и полные капитальные затраты на 1 км

Турция расположена между 36 и 42° с.ш. и 26 и 45° в.д. и обладает самыми большими в Европе после Испании потенциальными возможностями в части солнечного излучения. Согласно результатам исследования, проведённого Организацией по обследованию электроснабжения, в Турции средняя годовая продолжительность солнечного света составляет 2737 ч (7,5 ч в день), а средняя доза солнеч-

Средние интервал и продолжительности наличия дневного света в Анталии

Месяц	Средний период наличия дневного света, ч:мин	Средняя суточная продолжительность наличия дневного света, ч:мин	Средняя месячная продолжительность наличия дневного света, ч
Январь	06:41 / 17:33	13:08	407,13
Февраль	06:20 / 18:03	12:17	343,93
Март	05:41 / 18:31	11:10	346,17
Апрель	05:55 / 20:00	09:55	297,5
Май	05:19 / 20:28	08:51	274,35
Июнь	05:07 / 20:49	08:18	249
Июль	05:21 / 20:45	08:36	266,6
Август	05:48 / 20:14	09:34	296,57
Сентябрь	06:13 / 19:30	10:43	321,5
Октябрь	06:40 / 18:45	11:55	369,42
Ноябрь	06:09 / 17:15	12:54	387
Декабрь	06:35 / 17:11	13:24	402
		Всего:	3961,17

Таблица 4

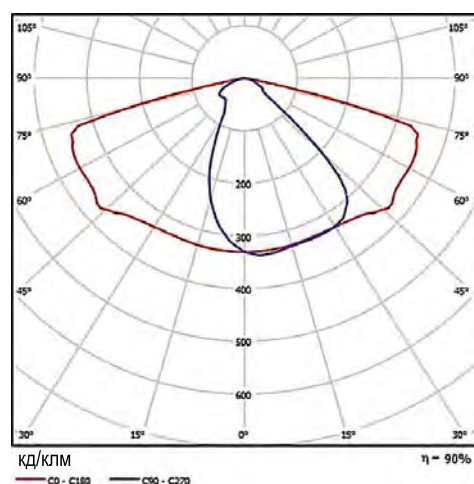
Результаты оптимизации для дороги класса МЗ в Анталии

Параметр	Схема расположения светильников			
	Двухрядная центральная		Двухрядная прямоугольная	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
Шаг, м	30	49	28	51
Мощность светильника, Вт	2×46	2×73	39	73
Напряжение и ёмкость аккумулятора, В/А·ч	12/416,6	2 x 12/333,3	12/166,6	12/250
Мощность ФЭ панели, Вт	530	800	240	540
Угол наклона ФЭ панели, град.	36,90			
Стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч	0,227	0,225	0,258	0,228
Первоначальная стоимость аккумулятора и ФЭУ, \$	1129	1829	490,05	790,80
Современная чистая стоимость аккумулятора и ФЭУ, \$	1233	1933	594,19	977,51
Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, \$	104,14			
Электроэнергия, вырабатываемая ФЭУ в год, кВт·ч/год	823	1227	384	886
Избыточная электроэнергия, вырабатываемая ФЭУ в год, кВт·ч/год	400,3	559,7	204,5	551,7
Избыточная электроэнергия/вся вырабатываемая электроэнергия, %	48,7	45,6	53,3	62,3
Электроэнергия, потребляемая нагрузкой, кВт·ч/год	365	578	155	289
Необеспеченная нагрузка, %	0			
Автономность, ч	83,84	84,86	79,13	63,66
Уменьшение выброса CO ₂ , кг/год	178,85	283,22	75,95	141,61

Сравнение времени окупаемости и капитальных затрат в расчёте на 1 км

Параметр	Схема расположения светильников			
	Двухрядная центральная		Двухрядная прямоугольная	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
Шаг, м	30	49	28	51
Мощность светильника, Вт	92	146	39	73
Высота опоры, м	8	9,5	7	10
Современная чистая стоимость аккумулятора и ФЭУ, \$	1233	1933	594,19	977,51
Стоимость светильника с СД, \$	591	649,5	285	295,5
Стоимость регулятора заряда, \$	100	125	75	100
Срок окупаемости энергетической установки, лет	28,53	27,82	33,73	29,13
Стоимость электроэнергии в расчёте на 1 опору, \$/кВт·ч	0,227	0,225	0,258	0,228
Стоимость гранёной осветительной опоры из оцинкованной стали, \$	123,04	170,36	102,62	184,10
Стоимость кронштейна, \$	10,09	4,60	7,35	7,35
Стоимость установки опоры, \$	65,31	90,43	54,47	97,72
Стоимость кабеля, \$	2,88	3,42	2,52	3,6
Стоимость прокладки кабеля, \$	0,96	1,14	0,84	1,2
Полная стоимость одной смонтированной опоры, \$	2126,28	2977,45	1121,99	1666,98
Количество опор на 1 км, шт./км	34	21	36 x 2	20 x 2
Полная стоимость ОУ в расчёте на 1 км, \$/км	72293,52	62526,45	80783,28	66679,2
Годовая продолжительность работы, ч	3961,17			
Годовое потребление электроэнергии в расчёте на 1 км, кВт·ч/км	12390,54	12144,95	11122,96	11566,62

Рис. 1. Кривые силы света светильников



ного света составляет 1527 кВт·ч/м² в год (4,2 кВт·ч/м² в день). Анталия расположена между 36° 07' и 37° 29' с.ш. и между 29° 20' и 32° 35' в.д. Находясь в средиземноморской ча-

сти Турции, Анталия является турецким туристическим центром и пятой по населению провинцией Турции. В Анталии средняя годовая продолжительность солнечного света составля-

ет 3014 ч, а средняя доза солнечного света составляет 1650 кВт·ч/м² в год [19]. Карта наличия солнечного света в Турции и данные о дозе солнечного излучения и показателе чистоты неба (*clearness index*) для Анталии приведены на рис. 2. Эти данные были извлечены при помощи программы HOMER из Базы данных по метеорологии и солнечному свету НАСА.

Конфигурацию энергетической установки моделировали и оптимизировали применительно к наименьшим полным чистым приведённым расходам при помощи программы HOMER. Результаты оптимизации для одной опоры приведены в табл. 4.

После проведения оптимизации были рассчитаны периоды окупаемости ФЭУ и полные стоимости ОУ в целом в расчёте на 1 км. При расчёте периода окупаемости использовалась

Часы работы ОУ и годовое потребление энергии при использовании светорегулирования, кВт·ч

Час	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
0	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
1	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
2	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
3	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
4	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
5	0,102	0,102	0,07	0,094	0,032	0,011	0,036	0,081	0,102	0,102	0,102	0,102
6	0,07	0,034	0	0	0	0	0	0	0,022	0,067	0,015	0,015
В период между 7:00 и 17:00 освещение не требуется												
17	0,066	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,11	0,11
18	0,146	0,144	0,07	0	0	0	0	0	0	0,036	0,146	0,146
19	0,146	0,146	0,146	0	0	0	0	0	0,074	0,146	0,146	0,146
20	0,146	0,146	0,146	0,146	0,078	0,026	0,036	0,112	0,146	0,146	0,146	0,146
21	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146
22	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146
23	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146

Таблица 7

Светотехнические расчёты при наличии и отсутствии светорегулирования

Параметр	Класс по освещению	
	M3	M4
Схема расположения светильников	Двухрядная центральная	
Световой поток светильника, лм	9270	6952.5
Мощность светильника, Вт	73	51.1
Световая отдача светильника, лм/Вт	126,99	136.06
Шаг, м	49	
Высота подвеса, м	9,5	
Длина кронштейна, м	0,5	
L_{avg} , кд/м ²	1,02	0.77
U_o	0,40	0.40
U_l	0,51	0.51
TI, %	14	13
SR	0,89	

3.3. Результаты расчётов в случае светорегулирования

Согласно Методам и принципам использования светильников с СД для общего освещения [13], которые были опубликованы Министерством энергетики и природных ресурсов Турции, для уменьшения уровня освещённости в ОУ с СД следует в обязательном порядке использовать светорегулирование. В случае дороги класса M3 по освещению светорегулирование означает уменьшение её класса до M4.

Расчёты осуществлялись для дороги класса M3 по освещению применительно к двухрядной центральной схеме расположения светильников, а использовавшееся светорегулирование приводило к изменению класса этой дороги по освещению на M4. Годовые часы работы ОУ выбранной дороги и потребляемая ею энергия приведены в табл. 6.

Считалось, что с момента включения ОУ и до полуночи освещение будет работать в режиме, соответствующем классу M3 по освещению, а от полуночи до выключения ОУ будет работать в режиме светорегулирования, соответствующем классу M4 по освещению. В этом случае ОУ будет

стоимость электроэнергии по состоянию на май 2016 г. (0,128 \$/кВт·ч). Как следует из табл. 5, при максимальном расстоянии между опорами и двухрядной центральной схеме расположения светильников наименьшие значения периода окупаемости и стоимости

ОУ в расчёте на 1 км составили, соответственно, 27,82 лет и \$ 62526,45, а при минимальном расстоянии между опорами и двухрядной прямоугольной расположения светильников они составили, соответственно, 33,73 лет и \$ 80783,28.

Сравнение результатов оптимизации для обычного режима работы и работы в режиме светорегулирования

Параметр	Обычный режим	Светорегулирование
Напряжение и ёмкость аккумулятора, В/А·ч	2 x 12 / 333,3	12 / 500
Мощность ФЭ панели, Вт	800	770
Угол наклона ФЭ панели, град	36,90	
Полная приведённая стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч	0,225	0,210
Первоначальная стоимость аккумулятора и ФЭУ, \$	1829	1398
Современная чистая стоимость аккумулятора и ФЭУ, \$	1933	1506
Стоимость регулятора заряда, \$	125	
Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, \$	104,14	
Электроэнергия, потребляемая нагрузкой, кВт·ч/год	578	483
Необеспеченная нагрузка, %	0	
Автономность, ч	84,86	76,16
Уменьшение выброса CO ₂ , кг/год	283,22	236,67

Таблица 9

Срок окупаемости капиталовложений в энергосистему и полная стоимость установки в расчёте на 1 км в современных условиях и в будущем

Сценарий	Вариант	Современная чистая стоимость энергосистемы, \$	Электроэнергия, потребляемая нагрузкой, кВт·ч/год	Срок окупаемости, лет	Полная стоимость установки, \$/км
Современные условия	Обычный режим	2058	578	27,82	62526,45
	Светорегулирование	1631	483	26,38	53559,45
Увеличение стоимости электроэнергии на 25 %	Обычный режим	2058	578	22,25	62526,45
	Светорегулирование	1631	483	21,10	53559,45
Уменьшение стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 25 %	Обычный режим	1599	578	21,61	52887,45
	Светорегулирование	1280	483	20,70	46188,45
Уменьшение стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %	Обычный режим	1144	578	15,46	43332,45
	Светорегулирование	929,87	483	15,04	38835,72
Увеличение стоимости электроэнергии на 25 % и уменьшение стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %	Обычный режим	1144	578	12,37	43332,45
	Светорегулирование	929,87	483	12,03	38835,72

работать 3961,17 ч в год, из которых 1777,26 ч она будет работать в режиме, соответствующем классу М3 по освещению, и 2183,91 ч – в режиме, соответствующем классу М4 по освещению. Результаты светотехнических расчётов, проведённых применительно к использованию светорегулирования, приведены в табл. 7.

В случае светорегулирования при переходе после полуночи от М3 к М4 световой поток светильника мощно-

стью 73 Вт уменьшится на 25 %, и, таким образом, потребляемая светильником мощность уменьшится от 73 до 51,1 Вт. Для того, чтобы определить новые характеристики ФЭУ и аккумулятора в условиях светорегулирования, моделирование в программе HOMER было выполнено снова. Сравнение результатов оптимизации, соответствующих обычному режиму и режиму светорегулирования, приведены в табл. 8.

3.4. Периоды окупаемости и полные капитальные расходы в современных условиях и в будущем

После проведения оптимизации были рассчитаны периоды окупаемости ФЭУ и полные стоимости ОУ в целом в расчёте на 1 км. Расчёты производились применительно к дороге класса М3 по освещению при максимальном расстоянии между опо-

рами, двухрядной центральной схеме расположения светильников и наличии светорегулирования. Помимо современных условий, период окупаемости капиталовложений в энергетическую установку был рассчитан и применительно к возможным в будущем сценариям: 1) увеличению тарифов на электроэнергию на 25 %; 2) уменьшению стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 25 %; 3) уменьшению стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %; и 4) увеличению тарифов на электроэнергию на 25 % при уменьшении стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %. Периоды окупаемости капиталовложений в энергетическую установку и полные стоимости ОУ в расчёте на 1 км в современных и возможных в будущем условиях приведены в табл. 9.

4. Заключение

В работе проведён технико-экономический анализ автономных установок дорожного освещения в условиях провинции Анталия, Турция. В первой части работы было получено, что оптимальным для находящейся в Анталии дороги класса МЗ по освещению вариантом автономной ФЭУ ОУ с СД является ОУ с двухрядной центральной схемой расположения светильников и максимальным расстоянием между опорами. Во второй части работы применительно к полученным оптимальным проектным решениям был проведён технико-экономический анализ энергетической установки в случае светильников с СД, после полуночи работающих в режиме пониженной мощности. При этом после полуночи мощность светильника с СД уменьшается от 2×73 до $2 \times 51,1$ Вт, в результате чего мощность ФЭУ уменьшается от 800 до 770 Вт, а аккумуляторы должны обеспечивать не 2×12 В, 333,3 А·ч, а 12 В, 500 А·ч. В год светильники с СД работали 2183,91 ч в режиме пониженной мощности и 1777,26 ч в режиме полной мощности.

Как при наличии, так и при отсутствии светорегулирования, период окупаемости установок составил от 28 до 26 лет при сохранении современных условий и от 22 до 20 лет при увеличении стоимости электроэнергии на 25 % или уменьшении стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на

25 %. В упомянутых случаях периоды окупаемости превышают сроки службы установок, но эти периоды можно сократить до менее чем 20 лет, например, до 15 лет при уменьшении стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %, а при одновременном увеличении ещё и стоимости электроэнергии на 25 % – даже до 12 лет.

При использовании светорегулирования, в современных условиях чистые приведённые расходы на всю ОУ уменьшились от \$ 62526,45 до \$ 53559,45 на 1 км дороги, то есть на 14,3 %, а в случае наиболее выигрального возможного сценария (увеличение стоимости электроэнергии на 25 % и уменьшение стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %), эти расходы уменьшатся от \$ 43332,45 до \$ 38835,72 на 1 км дороги, то есть на 10,4 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu, M.S., Huang, H.H., Huang, B.J., Tang, C.W., Cheng, C.W. Economic feasibility of solar powered led roadway lighting // *Renew Energy*. – 2009. – Vol. 34. – P. 1934–1938.
2. Liu, G. Sustainable feasibility of solar photovoltaic powered street lighting systems // *Int. J. Elect. Power Energy Syst.* – 2014. – Vol. 56. – P. 168–174.
3. Velaga, R., Kumar, A. Techno-economic evaluation of the feasibility of a smart street system: A case study of rural India // *Procedia Social and Behavioral Sciences*. – 2012. – Vol. 62. – P. 1220–1224.
4. Khalil, A., Rajab, Z., Amhammed, M., Asheibi, A. The benefits of the transition from fossil fuel to solar energy in Libya: A street lighting system case study // *Appl. Sol. Energy*. – 201. – Vol. 53. – P. 38.
5. 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. – P. 79–85.
6. Baurzhan, S., Jenkins, G.P. Off-grid solar PV: is it an affordable or appropriate solution for rural electrification in sub-Saharan African countries? // *Renew Sustain Energy Rev.* – 2016. – Vol. 60. – P. 1405–1418.
7. Feldman, D., Barbose, G., Margolis, R., Bolinger, M., Chung, D., Fu, R., Seel, J., Davidson, C., Wiser, R. Photovoltaic System Pricing Trends Historical, Recent, and Near-Term Projections. National Renewable Energy Laboratory Publications 2015.
8. EnergyTrend PV. PV Spot Prices. Retrieved 13 May 2016, from <https://pv.energytrend.com/pricequotes.html>.

9. International Commission on Illumination. Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic. 2010, CIE Central Bureau CIE115.

10. EN13201–2:2003. Road Lighting. Part 2: Performance Requirements. CEN, Brussels.

11. Güler, Ö., Onaygil, S. Yol Aydınlatması Tesisatlarında Armatür Fotometrik Değerlerinin Önemi, IV. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu, 2017, İzmir. – P. 125–135.

12. TUIK. Distribution of net electricity consumption by sectors. Retrieved May 2016, from www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=1579.

13. TEDAŞ. Technical Specification for LED Light Sourced Road Lighting Luminaires. 2015

14. Republic of Turkey The Ministry of Energy and Natural Resources. Procedures and Principles on the Usage of LED Luminaires in the General Lighting Scope. 2015

15. EN13201–3 Road lighting Part 3: Calculation of Performance. Publication 270–2003.

16. TEDAŞ, Technical Specifications for Road Lighting Luminaires TEDAŞ MYD-95–009..B. 2008.

17. CIE Pub. 154. The Maintenance of Outdoor Lighting Systems, International Commission on Illumination. 2003, Wien.

18. ABB. Turkey Energy Efficiency Report. 2011.

19. General Directorate of Electrical Power Resources Survey and Development Administration. Turkey Solar Energy Potential Atlas of Turkey. Retrieved May 2016, from www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx.



Анил Кан Дюман (Anil Can Duman),
M. Sc. Сотрудник Энергетического института Стамбульского технического университета



Ёндер Гюлер (Önder Güler),
Ph.D. (2001 г.). Профессор Энергетического института Стамбульского технического университета (с 2015 г.). Член Турецкой национальной

комиссии по освещению и Общества инженеров-электриков. Научные интересы – дорожное освещение, энергосбережение, управление потреблением энергии в промышленности и зданиях, энергия ветра, качество электроэнергии