

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-499-510>

УДК 621.32

Особенности моделирования режимов работы линий наружного освещения

В. Н. Калечиц¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Обоснована необходимость моделирования режимов работы линий наружного освещения напряжением 0,23/0,4 кВ. Выбор оптимальной конфигурации осветительной линии при обеспечении нормируемых значений освещенности и яркости на рабочей поверхности рекомендуется осуществлять, сравнивая несколько вариантов с разными расположениями опор, типами кривых сил света, количеством и мощностью светильников. Результаты светотехнического расчета являются основой для моделирования электрических режимов работы линий наружного освещения, позволяющего определить режимные параметры (напряжение узлов, активную и реактивную мощность, ток, падение напряжения, потери активной и реактивной мощности на отдельных участках). Полученные данные можно использовать для выбора площади сечения жил проводников и прогноза электропотребления наружного освещения с учетом особенностей регулирования светового потока (диммирования). Как правило, линии наружного освещения подключены к одному пункту питания. Предложено применение линий наружного освещения с двусторонним питанием для магистральных улиц и кольцевых дорог относительно большой протяженности, что позволит не только повысить надежность электроснабжения осветительных установок, но и использовать проводники с меньшей площадью сечения жил. Электрическая нагрузка источников света принимается на основе статических характеристик. Моделирование электрических режимов сети наружного освещения осуществляется с учетом высших гармоник тока и напряжения. Рациональный режим работы линии наружного освещения определяется величиной отклонения напряжения от номинального значения, показателями несинусоидальности и несимметрии напряжения в пункте питания. Дополнительные возможности моделирования режимов работы осветительных линий заключаются в поиске повреждений (выявлении коротких замыканий, определении наличия неисправных светильников).

Ключевые слова: наружное освещение, осветительная линия, светильник, моделирование режима

Для цитирования: Калечиц, В. Н. Особенности моделирования режимов работы линий наружного освещения / В. Н. Калечиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 499–510. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-499-510>

Адрес для переписки

Калечиц Вячеслав Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
kalechyts@bntu.by

Address for correspondence

Kalechyts Viachaslau N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
kalechyts@bntu.by

Features of Modeling the Operating Modes of Outdoor Lighting Lines

V. N. Kalechyts¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The necessity of modeling the operating modes of outdoor lighting lines with a voltage of 0.23/0.4 kV is substantiated. The choice of the optimal configuration of the lighting line while ensuring the standardized values of illumination and brightness on the working surface is recommended to be carried out by comparing several variants with different positions of pillars, types of light intensity curves, the number and power of luminaires. The results of the lighting calculation are the basis for modeling the electrical operation modes of outdoor lighting lines, which allows determining the operating parameters (node voltage, active and reactive power, current, voltage drop, loss of active and reactive power in individual sections). The obtained data can be used to select the cross-sectional area of conductor cores and forecast the power consumption of outdoor lighting, taking into account the specific features of light flux regulation (dimming). As a rule, outdoor lighting lines are connected to one power point. The use of outdoor lighting lines with bilateral supply for main streets and circular roads of relatively long length is proposed which will not only make it possible to increase the reliability of power supply of lighting installations, but also to use conductors with a smaller cross-section area of the cores. The electrical load of light sources is assumed on the basis of static characteristics. Modeling of the electrical modes of the outdoor lighting network is carried out taking into account the higher harmonics of current and voltage. The rational operation mode of the outdoor lighting line is determined by the magnitude of the voltage deviation from the nominal value, the indicators of non-sinusoidality and voltage asymmetry at the power supply point. Additional possibilities for modeling the modes of operation of lighting lines are to search for damage (detection of short circuits, determination of the presence of faulty lamps).

Keywords: outdoor lightning, lighting line, luminaire, modeling of a mode

For citation: Kalechyts V. N. (2022) Features of Modeling the Operating Modes of Outdoor Lighting Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (6), 499–510. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-499-510> (in Russian)

Введение

Система наружного освещения имеет сложную структуру, представляет собой множество отдельных, технически локальных осветительных систем как конечных элементов электроэнергетической системы [1] (рис. 1).

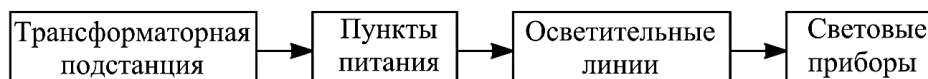


Рис. 1. Структурная упрощенная схема системы наружного освещения

Fig. 1. Structural simplified scheme of the outdoor lighting system

Моделирование режимов работы конкретных осветительных линий напряжением 0,23/0,4 кВ целесообразно осуществлять для принятия решений на стадии проектирования и при модернизации систем наружно-

го освещения. Рациональность условий их эксплуатации при обеспечении необходимого качества освещения можно оценить по расходу электроэнергии, сроку службы источников света, затратам на обслуживание и др.

Проектирование осветительных установок наружного освещения, в результате которого осуществляется выбор количества, типа и мощности используемых световых приборов, расположения опор, схемы питания, площади сечения жил проводников осветительной линии, – многокритериальная задача. В настоящее время при проектировании, как правило, пользуются рядом упрощений:

- выбор площади сечения жил проводников по условию допустимой потери напряжения осуществляется без учета индуктивного сопротивления;
- расчетная мощность световых приборов принимается равной номинальной (независимо от реальной величины напряжения на их зажимах);
- не учитывается влияние несинусоидальности токов и напряжений, несимметрии напряжений, а также возможные варианты работы осветительных линий (вечерний и ночной режимы).

Для математического моделирования режимов работы линии наружного освещения требуется наличие полной информации о светильниках, конфигурации линии, способах управления и возможностях регулирования. В качестве исходной информации используют результаты светотехнического расчета (расположение, количество, тип и мощность световых приборов). Далее осуществляют электрический расчет линии наружного освещения с односторонним (двусторонним) питанием при различных вариантах работы (вечерний, ночной и др.).

Особенности светотехнического расчета наружного освещения

Светотехнические расчеты определяют расположение опор, количество, мощность, высоту установки и угол наклона светильников на опоре. Конфигурация осветительной линии зависит от назначения освещаемого объекта, для которого нормируются средняя яркость покрытия $L_{\text{ср}}$ и средняя горизонтальная освещенность $E_{\text{ср}}$ в соответствии с СН 2.04.03–2020 [2].

Современные нормы наружного освещения содержат значения не только средней яркости дорожного покрытия, но и ее равномерности (полную и продольную), приращения пороговой разности яркостей, коэффициент периферийного освещения [3]. Также могут использоваться новые способы расчета видимости объектов дорожного движения на основе статистического подхода к описанию обнаружения и опознавания объектов зрительной системой человека [4], рассмотрение на стадии проектирования нескольких углов наблюдения, для которых определяется яркость [5]. Обеспечение нормируемых показателей зависит от правильности выбора способа расположения опор, шага между осветительными опорами, коли-

чества и типа световых приборов на опоре, угла наклона световых приборов по отношению к рабочей поверхности.

В качестве примера в функциональной программе для проектирования освещения DIALux осуществлен сравнительный светотехнический расчет для магистральной дороги общегородского назначения категории А с интенсивностью движения транспортных средств в обоих направлениях свыше 500 и до 1000 ед./ч. Нормируемые величины для такой дороги: средняя яркость покрытия $L_{cp} = 0,8$ кд/м², средняя горизонтальная освещенность покрытия $E_{cp} = 15$ лк [2]. Расчет уровней освещенности и яркости на проезжей части выполнен для светильников производства GALAD [6] типов ЖКУ02-100-003 «Пегас», ЖКУ02-150-003 «Пегас» и ЖКУ02-250-003 «Пегас» и (с номинальной мощностью ламп 100, 150 и 250 Вт соответственно) на основании следующих исходных данных: ширина проезжей части с четырьмя полосами движения $d = 16$ м; высота установки светильника 8 м; вылет светильника от края проезжей части 0,5 м; одностороннее расположение опор; расстояние между опорами $H = 25$ м, от края проезжей части дороги до опоры 1 м; на опоре один светильник с углом наклона к горизонту 15°; коэффициент запаса 1,5; КПД светильника 70 %; кривая силы света светильников типа «Д» (косинусная) [6].

С помощью программы DIALux получены уровни и распределение освещенности в фиктивных цветах, средняя яркость дорожного покрытия для трех наиболее распространенных на практике способов расположения осветительных опор:

- по одну сторону проезжей части;
- по обе стороны проезжей части друг напротив друга;
- по обе стороны проезжей части со сдвигом (шахматное расположение).

Результаты этих расчетов представлены на рис. 2 и в табл. 1. В первой строке табл. 1 рассчитаны параметры при шаге $H = 25$ м, во второй строке – при минимальном шаге H_{min} , обеспечивающем среднюю яркость покрытия не менее 0,8 кд/м² и среднюю горизонтальную освещенность покрытия не менее 15 лк (т. е. минимально допустимые требования к качеству освещения). Также указаны значения минимальной и максимальной освещенности (E_{min} и E_{max}), показывающие ее неравномерность на дорожном покрытии. На основе представленных данных можно сделать вывод, что оптимальным способом размещения опор для обеспечения лучшей равномерности освещенности на рабочей поверхности является расположение по обе стороны со сдвигом, при котором отсутствуют темные полосы, характерные для размещения опор друг напротив друга или по одну сторону. Поэтому для варианта расположения светильников по обе стороны дороги со сдвигом можно применить больший шаг между опорами, что позволит минимизировать капиталовложения в осветительную линию.

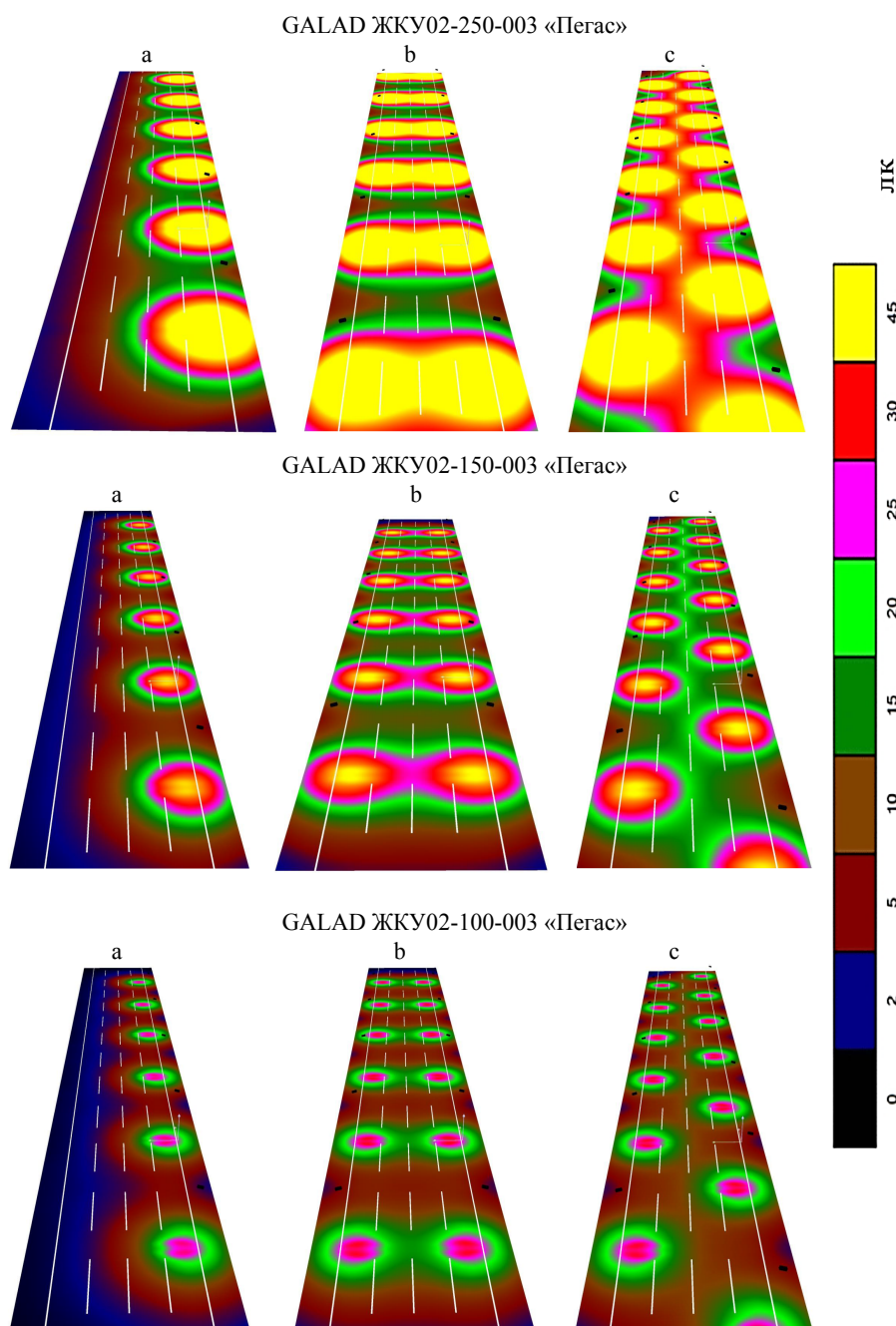


Рис. 2. Уровни освещенности (в фиктивных цветах) дорожного покрытия при применении светильников производства GALAD разной мощности с расположением: а – по одну сторону дороги; б – по обе стороны дороги друг напротив друга; с – по обе стороны дороги со сдвигом

Fig. 2. Illumination levels (in fictitious colors) of the road surface when using GALAD luminaires of different power and location: а – on one side of the road; б – on both sides of the road opposite each other; с – on both sides of the road with a shift

Таблица 1

**Результаты сравнительных светотехнических расчетов дорожного освещения
с разным расположением и мощностью светильников**

**Results of comparative lighting calculations of road lighting
with different location and power of luminaires**

Расположение светильников	Тип светильника производства GALAD	Шаг между опорами H , м	Средняя яркость $L_{\text{ср}}$, кд/м ²	Освещенность, лк		
				средняя $E_{\text{ср}}$	минимальная E_{min}	максимальная E_{max}
По одну сторону дороги	ЖКУ02-100-003 «Пегас»	25	0,31	7	2	27
		10	0,80	16	4	37
	ЖКУ02-150-003 «Пегас»	25	0,50	11	3	41
		16	0,80	17	4	46
	ЖКУ02-250-003 «Пегас»	25	0,97	23	5	80
		30	0,80	18	3	78
По обе стороны дороги друг напротив друга	ЖКУ02-100-003 «Пегас»	25	0,66	13	7	29
		20	0,82	17	11	31
	ЖКУ02-150-003 «Пегас»	25	1,05	22	11	44
		30	0,80	15	4	42
	ЖКУ02-250-003 «Пегас»	25	1,67	36	9	83
		60	0,83	18	1	82
По обе стороны дороги со сдвигом	ЖКУ02-100-003 «Пегас»	25	0,66	13	7	29
		20	0,82	17	11	31
	ЖКУ02-150-003 «Пегас»	25	1,05	22	11	44
		30	0,87	18	7	41
	ЖКУ02-250-003 «Пегас»	25	2,00	43	19	84
		60	0,83	18	4	78

Примечание. В первой строке (голубой цвет) рассчитаны параметры при шаге $H = 25$ м, во второй строке (зеленый цвет) – при минимальном шаге H_{min} , обеспечивающем среднюю яркость покрытия $L_{\text{ср}}$ не менее $0,8$ кд/м² и среднюю горизонтальную освещенность покрытия $E_{\text{ср}}$ не менее 15 лк.

Особенности выбора типа кривой силы света рассмотрены на примере светильников производства GALAD [6] ЖКУ02-150-003 «Пегас» и ЖКУ21-150-002 «Гелиос» с кривыми силами света типа «Д» (косинусная) и «Ш» (широкая) соответственно (табл. 2). На основании светотехнического расчета уровней освещенности E и яркости L с помощью программы DIALux (рис. 3, табл. 2) для рассмотренного примера с односторонним расположением опор целесообразно применять светильники с кривой силы света типа «Ш» (широкой) по причине более равномерного распределения освещенности на рабочей поверхности.

Таблица 2

Результаты сравнительных светотехнических расчетов дорожного освещения с разными кривыми силы света светильников при одностороннем расположении опор

The results of comparative lighting calculations of road lighting with different luminous intensity curves of luminaires when the latter have one side location

Тип кривой силы света светильника	Тип светильника производства GALAD	Шаг между опорами H , м	Средняя яркость $L_{\text{ср}}$, кд/м ²	Освещенность, лк		
				средняя $E_{\text{ср}}$	минимальная E_{min}	максимальная E_{max}
Ш	ЖКУ21-150-002 «Гелиос»	25	1,65	23	8	46
Д	ЖКУ02-150-003 «Пегас»	25	0,80	17	7	41

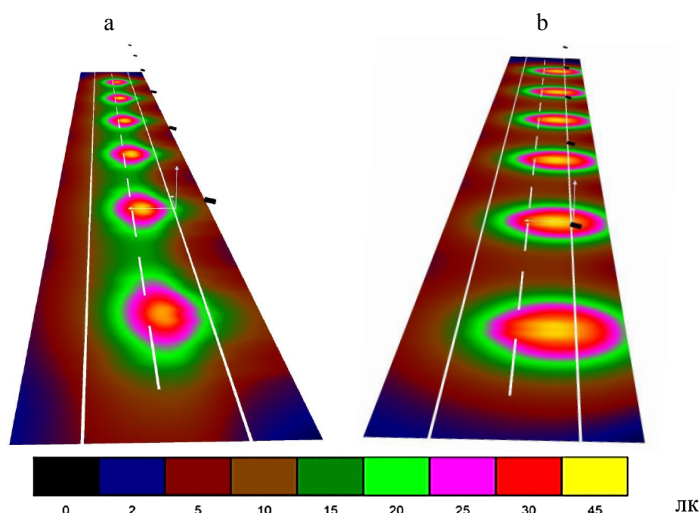


Рис. 3. Уровни освещенности (в фиктивных цветах) дорожного покрытия при применении светильников GALAD типа: а – ЖКУ21-150-002 «Гелиос»; б – ЖКУ02-150-003 «Пегас»

Fig. 3. Illumination levels (in fictitious colors) of the road surface when using luminaires GALAD of the type: а – ЖКУ [yellow cantilever street luminaire] 21-150-002 Helios; б – ЖКУ02-150-003 Pegasus

При проведении светотехнических расчетов необходимо учитывать возможность применения таких мероприятий по экономии электроэнергии, как отключение части светильников, диммирование (регулирование светового потока источников света), использование автоматических систем с регулированием светового потока источников света в зависимости от наличия движения транспорта, пешеходов и др.

Моделирование режимов работы линий наружного освещения

Режимные параметры (напряжение узлов, активная и реактивная мощность, ток, падение напряжения, потери активной и реактивной мощности

на отдельных участках линии), полученные при моделировании конкретных условий работы осветительных линий, необходимы для решения следующих задач:

- выбора площади сечения жил проводников, схемы питания;
- анализа способов управления и регулирования (диммирования);
- прогноза электропотребления;
- улучшения параметров качества электроэнергии;
- осуществления поиска неисправностей (выявление коротких замыканий, повреждений световых приборов).

Практическое решение перечисленных задач позволяет обеспечить рациональные режимы работы систем наружного освещения.

Расчет параметров электрической сети наружного освещения имеет особенности, касающиеся исходной информации, которая рассматривается по отношению к существующим и проектируемым линиям. Линии наружного освещения характеризуются значительной протяженностью и использованием большого количества источников света мощностью 100–400 Вт. В таких условиях для определения и поддержания рациональных режимов работы необходимо правильно выбрать площадь сечения жил проводников линии. Выбранное сечение должно обеспечивать требуемые уровни напряжения на источниках света во всех режимах, но при этом не быть завышенным, чтобы не увеличивать стоимость электрической сети. Кроме того, следует учитывать индуктивное сопротивление проводников, зависимость активной и реактивной мощности светильника от уровня напряжения на нем, наличие высших гармоник тока и напряжения [7].

Линии наружного освещения, как правило, подключаются к одному пункту питания, а в зависимости от категории надежности электроприемников для них может предусматриваться возможность переключения на второй источник питания. В реальных условиях эксплуатации, например в г. Минске, нет осветительных линий, получающих питание в нормальном режиме от двух пунктов.

В [8, 9] рассмотрен вариант повышения надежности электроснабжения осветительных установок путем применения линий с двусторонним питанием. При оценке возможности его применения следует производить расчеты при разных режимах работы линии (нормальная эксплуатация; с отклонениями напряжений в пунктах питания от номинальных значений; с односторонним питанием; с наличием несимметричности параметров линии; при возможных режимах экономии электроэнергии в ночное время).

Моделирование режимов работы (рис. 4) ориентировано на более точное определение параметров линий с учетом изменения активной и реактивной мощности светильников в зависимости от уровня напряжения в конкретных точках схемы.

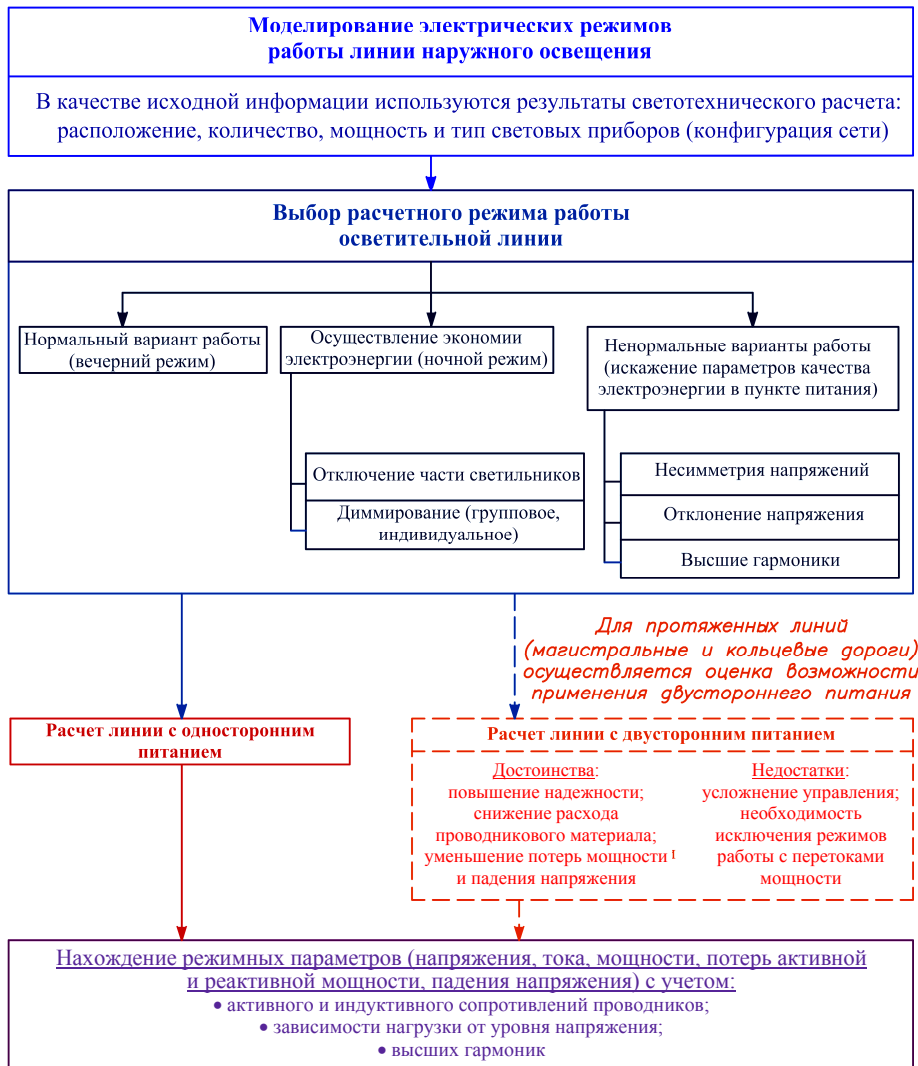


Рис. 4. Структурная схема моделирования режимов работы линий наружного освещения

Fig. 4. Structural diagram of modeling the operation modes of outdoor lighting lines

Предложено [8, 10] задавать электрическую нагрузку источников света на основе статических характеристик $P(U)$ и $I(U)$. Реализованные в среде Mathcad программы для линий с одно- и двусторонним питанием [8, 10, 11] позволяют смоделировать необходимую конфигурацию линии наружного освещения, используя в качестве исходных данных следующую информацию:

- расстояние от ТП 10/0,4 кВ до пункта питания;
- комплексное значение полной мощности светильников $S^{\text{Л}}$ (на основании зависимостей тока I и активной мощности P от величины напряжения U);
- расстояние от пункта питания до ближайшей опоры, шаг между опорами;

- количество опор, число светильников на опоре, распределение светильников по фазам;
- удельные активное и индуктивное сопротивления проводников в зависимости от площади сечения жилы;
- напряжения в фазах пункта питания $U_{\text{п}}$.

С помощью математических моделей [8, 10], реализованных в среде Mathcad, определяются режимные параметры для каждой фазы осветительной линии (с одно- и двусторонним питанием): активную, реактивную и полную мощность, ток, потери активной и реактивной мощности и падение напряжения на всех участках линии, напряжения в точках схемы, расход электроэнергии в зависимости от варианта работы линии (вечерний и ночной режимы, диммирование) и др.

Результаты моделирования режимов работы осветительных линий можно использовать для поиска повреждений:

- выявления коротких замыканий, при которых не происходит срабатывание защитных аппаратов; несрабатывание аппарата защиты возможно при коротком замыкании в конце протяженной линии (сопротивление значительное);
- определения наличия неисправных светильников в линии, что позволит минимизировать расходы на объезд по выявлению неисправных источников света.

Обнаружение указанных повреждений основывается на сравнении величины токов в начале линии при известном уровне напряжения в пункте питания с учетом возможных режимов работы. Относительная протяженность линии наружного освещения может приводить к несрабатыванию защитных аппаратов. Ток короткого замыкания в этом случае сопоставим с током при работе линии без повреждения, поэтому следует применять дополнительную установку защитных аппаратов (деление на части).

При рассмотрении варианта без установки дополнительных защитных аппаратов необходимо реализовывать следующий алгоритм действий:

- 1) первоначально в разработанных программах [8, 10] рассчитываются параметры линии с разным уровнем напряжения в пункте питания с учетом наличия (отсутствия) возможности экономии электроэнергии на конкретной линии, т. е. моделируются возможные варианты работы линии;
- 2) в условиях эксплуатации в режиме реального времени в диспетчерском пункте периодически осуществляется автоматическое сравнение расчетных величин с реальными;
- 3) при значительном расхождении реальных величин с расчетными производится выявление его причин.

Важно учитывать уровень напряжения в пункте питания, величину тока, коэффициент мощности в начале линии и режим работы линии (ночной, вечерний, несимметрия напряжения и др.). Если сравнение производить без учета уровня напряжения в пункте питания, то возможно совпадение реальной величины тока короткого замыкания и расчетного тока при работе без короткого замыкания. В целом возможность такого совпадения можно оценить, рассчитав токи коротких замыканий на основе реальной информации.

При выходе из строя газоразрядной лампы высокого давления в ряде случаев в эксплуатации остается пускорегулирующая аппаратура светильника, что может привести к перекомпенсации реактивной мощности для рассматриваемой линии. Чтобы этого избежать, рекомендуется использовать системы с индивидуальным управлением каждым светильником. Следует учитывать, что это дорогостоящее решение со значительным усложнением системы управления и алгоритма сбора информации.

ВЫВОДЫ

1. Выбор оптимальной конфигурации осветительной линии при обеспечении нормируемых значений освещенности и яркости на рабочей поверхности необходимо осуществлять на основе сравнения нескольких вариантов с разными расположениями опор, типами кривых сил света, количеством и мощностью световых приборов.

2. С помощью разработанных в среде Mathcad программ [8, 10, 11] можно смоделировать линию наружного освещения необходимой конфигурации с одно- или двусторонним питанием и рассчитать режимные параметры для возможных вариантов работы (вечерний, ночной, диммирование).

3. Результаты моделирования режимов работы можно использовать для оценки электропотребления наружного освещения, а также при осуществлении мероприятий по обеспечению рациональных режимов работы линий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевкоплясов, П. М. Основы управления качеством городских осветительных систем / П. М. Шевкоплясов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 152 с.
2. Естественное и искусственное освещение: СН 2.04.03–2020. Введ. 24.03.2021. Минск: Мин-во арх. и строит. Респ. Беларусь, 2021. 86 с.
3. Светотехнические критерии оценки дорожного освещения (обзор) / М. Викари [и др.] // Светотехника. 2012. № 5. С. 51–59.
4. Боос, Г. В. Новый подход к определению качественных характеристик установок наружного освещения / Г. В. Боос, А. А. Григорьев // Светотехника. 2015. № 6. С. 21–26.
5. Штокмар, А. Расширение яркостного подхода к оценке дорожного и тоннельного освещения / А. Штокмар // Светотехника. 2015. № 5. С. 33–35.
6. Уличные светильники [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://galad.ru/catalog/outdoor/street>. Дата доступа: 22.09.2022.
7. Козловская, В. Б. Учет влияния высших гармоник при выборе сечений проводников линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557>.
8. Козловская, В. Б. Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием. Ч. 1 / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 549–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-549-562>.
9. Козловская, В. Б. Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием. Ч. 2 / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 30–40. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-30-40>.

10. Козловская, В. Б. Влияние величины напряжения на режим работы сети наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 3. С. 18–25.
11. Козловская, В. Б. Несимметричные режимы работы линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 232–245. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246>.

Поступила 04.07.2022 Подписана в печать 14.09.2022 Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Shevkopyasov P. M. (1986) *Fundamentals of Quality Management of Urban Lighting Systems*. Leningrad, Ergoatomizdat Publ. 152 (in Russian).
2. Building Regulations SN 2.04.03–2020. *Natural and Artificial Lighting*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2021. 86 (in Russian).
3. Vikari M., Piinen A.-M., Kufeoglu S., Luo V., Puolaka M., Halonen L. (2012) Criteria for Evaluating Road Lighting Lighting (Review). *Svetotekhnika = Light & Engineering*, (5), 51–59 (in Russian).
4. Boos G. V., Grigoriev A. A. (2015) A New Approach to Determining the Qualitative Characteristics of Outdoor Lighting Installations. *Svetotekhnika = Light & Engineering*, (6), 21–26 (in Russian).
5. Shtokmar A. (2015) Expansion of the Brightness Approach to the Assessment of Road and Tunnel Lighting. *Svetotekhnika = Light & Engineering*, (5), 33–35 (in Russian).
6. Street Lights. Available at: <https://galad.ru/catalog/outdoor/street> (accessed 22 September 2022) (in Russian).
7. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2017) Consideration of the Impact of High Harmonics when Selecting the Conductor Cross-Sections of Lines of Outdoor Lighting. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557> (in Russian).
8. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2016) Calculation of Operation Mode of Outdoor Lighting Line with Bilateral Supply. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 549–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-549-562> (in Russian).
9. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2017) Calculation of Operation Mode of Outdoor Lighting Line with Bilateral Supply. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 30–40. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-30-40> (in Russian).
10. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2013) Influence of Voltage Value on Operational Mode of Outdoor Lighting Grid Network. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 18–25 (in Russian).
11. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2019) Asymmetrical Modes of Outdoor Lighting Lines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 232–246. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246> (in Russian).

Received: 4 July 2022 Accepted: 14 September 2022 Published online: 30 November 2022