

Валиуллин К.Р., Семенова Н.Г.

Оренбургский государственный университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

В статье рассматривается вопрос повышения энергоэффективности сетей уличного освещения путем оптимизации параметров их элементов – сечения питающего проводника и количества светильников в сети уличного освещения. Предложена схема замещения сети уличного освещения и ее математическая модель, основанная на графоаналитическом методе расчета режимных параметров. Сформулирована задача оптимизации параметров элементов осветительной сети, формализованы ее граничные условия, заданные нормативными документами. В качестве критериев оптимизации предложены критерии минимизации капитальных и эксплуатационных затрат и максимизации освещаемой площади. Для решения поставленной задачи нахождения оптимального соотношения между минимизацией затрат на построение и эксплуатацию осветительной сети и максимизации освещаемой площади предложено использование метода скаляризации, позволяющего свести разнородные критерии к одному суперкритерию путем нормирования и свертки. Предложен алгоритм формирования альтернативных вариантов осветительной сети, учитывающий граничные условия, заданные нормативными документами, с помощью которого были сформированы альтернативы осветительной сети для различных сечений проводников, рассчитаны значения критериев оптимизации для каждого из вариантов. Анализ полученных результатов показал, что для поставленной задачи необходимо использовать мультипликативную свертку критериев. Разработанный подход позволяет решать задачу определения оптимального сечения проводника осветительной сети при известном количестве светильников, а также обратную задачу нахождения оптимального числа светильников в сети уличного освещения для заданного сечения проводника. Отмечено, что предложенный алгоритм может также быть использован для выбора оптимальных светильников, опор и прочих элементов сети уличного освещения при учете характеристик этих элементов в критериях оптимизации.

Ключевые слова: электрическая сеть уличного освещения, оптимизация параметров элементов электрической сети, снижение потерь, энергоэффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных составляющих электроэнергетической системы города, обеспечивающей комфортную жизнедеятельность людей, следует считать систему уличного освещения (СУО). Основной задачей при проектировании или модернизации СУО является определение количества светильников и расстояния между ними, а также сечений и типов проводников электрической сети. Причем количество и тип светильников выбирается с учетом регламентированных значений освещенности дорог и тротуаров в соответствии с нормативными документами, а сечение и тип проводников – с учетом проверки по длительно допустимому току [1] и по потере напряжения у наиболее удаленного светильника [1, 2], в соответствии с ПУЭ.

В настоящее время наиболее проработанными вопросами в области повышения энергоэффективности систем уличного освещения являются: внедрение энергосберегающих светильников [3]; разработка автоматизированных систем управления уличным освещением [4-5], оптимизация режимов работы электрических сетей уличного освещения [6-7]; снижение потерь мощности сетей уличного освещения [8-11] (частные случаи). Отмечая бесспорную ценность проведенных исследований, необходимо заметить, что вопросы по оптимизации параметров элементов СУО (определения оптимального числа светильников, максимальной протяженности осветительной сети) и ее электрических параметров, обеспечивающих минимальные потери электрической энергии и экономические затраты, в научных исследованиях рассмотрены не в полном объеме.

В связи с этим целью работы является определение оптимального сечения проводников, количества све-

тильников в СУО, при которых будут обеспечены минимальные капитальные затраты на создание СУО, минимальные эксплуатационные затраты на потери электрической энергии и максимальная освещаемая площадь с учетом ограничений по току, потере напряжения, освещенности.

МЕТОДЫ

1. Схема замещения СУО

Электрические сети уличного освещения обладают рядом особенностей, отличающих их от других электрических сетей низкого напряжения. В первую очередь, нагрузка сетей уличного освещения имеет распределенный характер – по мере удаления от головного участка нагрузка снижается. Это обстоятельство приводит к тому, что токовые нагрузки головных участков СУО значительно выше, чем у конечных, в связи с чем использование сечения проводника на удаленных участках СУО может осуществляться не в полном объеме.

Второй особенностью СУО является отсутствие колебаний нагрузки – режим работы характеризуется заранее известными значениями максимальной мощности электроприемников и графиком нагрузки, что позволяет рассматривать работу осветительной сети как продолжительно установившийся нормальный режим.

Для расчета режима работы СУО она представляется в виде физической модели – схемы замещения. При составлении схемы замещения СУО приняты следующие допущения:

– конфигурация исследуемой СУО является разомкнутой, радиально-магистрального типа, т.к. разомкнутые резервированные (с двумя источниками питания) и замкнутые СУО для нужд городского освещения используются очень редко (менее 10% от общего числа СУО);

– источник питания задаётся величиной напряжения на шинах питающего трансформатора. Внутреннее сопротивление источника питания не учитывается;

– поперечные проводимости проводников сети уличного освещения не учитываются в связи с низким напряжением сети [12];

– электротехническая часть светильника моделируется в виде нагрузки с постоянной мощностью $S = P + j \cdot Q$.

Ввиду того, что в работе рассматриваются только нормальные режимы работы СУО (диапазон напряжений $\pm 5\%$ от $U_{ном}$), нелинейностью статических характеристик нагрузки по напряжению можно пренебречь [13].

Схема замещения участка СУО, составленная с учетом предлагаемых допущений, представлена на рис. 1.

2. Математическая модель объекта оптимизации

При разработке математической модели представим СУО в виде графа, выделив общую магистраль и отходящие от неё радиальные ветви, количество узлов графа при этом равно количеству опор СУО (рис. 2).

Опираясь на работы [14-15], представим конфигурацию СУО в виде матрицы соединений $Con [n \times n]$, где n - количество узлов в сети, при этом $Con(k, j) = 1$, если узел k соединяется с узлом j и $Con(k, j) = 0$ во всех других случаях. Аналогичным образом задаются длины и сопротивления каждого из участков сети. Нагрузки представим в виде векторов $S[n]$, $P[n]$, $Q[n]$, где каждый элемент вектора соответствует нагрузке в узле с соответствующим номером. В этом случае режим работы СУО можно охарактеризовать вектором напряжений в узлах сети $U [n]$ и матрицей токов в каждой из ветвей $I [n \times n]$.

3. Критерии оптимизации

Под электротехническим критерием понимаем потери мощности в СУО. Потери мощности в осветительной сети могут быть найдены по формуле

$$\Delta P = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n I_{k,j}^2 \cdot R_{k,j} \quad (1)$$

где k, j – номера узлов осветительной сети; n - общее количество узлов; $I_{k,j}$ – ток, протекающий по участку по ветви, соединяющей узлы k и j в нормальном режиме работы осветительной сети, А; $R_{k,j}$ – сопротивление ветви, соединяющей узлы k и j , Ом.

Очевидно, что наиболее оптимальным решением будет то, в котором потери мощности в сети минимальны. Таким образом, первый критерий оптимизации может быть представлен как:

$$\Delta P = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n I_{k,j}^2 \cdot R_{k,j} \rightarrow \min \quad (2)$$

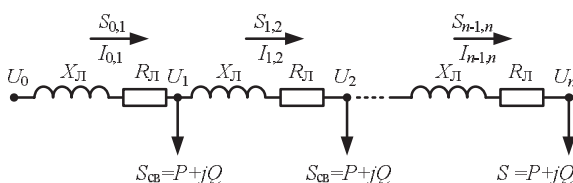


Рис. 1. Схема замещения участка электрической сети уличного освещения

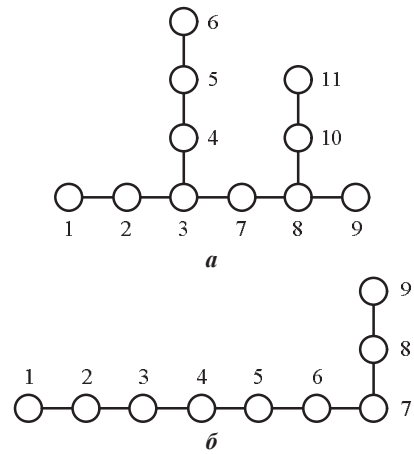


Рис. 2. Граф исследуемой электрической сети уличного освещения:
а – магистральная сеть с ответвлениями;
б – магистральная сеть без ответвлений

Под экономическим критерием в данной работе понимаем капитальные затраты, включающие в себя стоимость комплектующих электрической сети уличного освещения (светильники, опоры, провода) и их монтаж, а также эксплуатационные затраты, учитывающие расходы на потери электрической энергии в СУО.

Капитальные затраты можно представить в виде

$$C_{кап} = C_{пров} + C_{опор} + C_{свет} \quad (3)$$

$$C_{пров} = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n l_{k,j} \cdot C_{уд.пров} \quad (4)$$

$$C_{свет} = n(P[n] \neq 0) \cdot C_{св} \quad (5)$$

$$C_{опор} = n \cdot C_{оп} \quad (6)$$

где $C_{пров}$ – стоимость проводников, руб.; $C_{оп}$ – стоимость опор, руб.; $C_{свет}$ – стоимость светильников, руб.; $l_{k,j}$ – длина участка сети, соединяющего узлы j и k , км; $C_{уд.пров}$ – удельная стоимость проводников, руб./км; $C_{оп}$ – стоимость одной опоры с учетом ее монтажа, руб.; $C_{св}$ – стоимость одного светильника с учетом монтажа, руб.; $n(P[n] \neq 0)$ – количество ненулевых элементов в векторе нагрузок $P[n]$.

В качестве эксплуатационных затрат будем рассматривать стоимость потерь электрической энергии за год функционирования сети уличного освещения:

$$Z_{экспл} = \Delta P \cdot \tau_{max} \cdot C_{э/э} \quad (7)$$

где ΔP – потери в ЭСУО в номинальном режиме работы, кВт; τ_{max} – число часов максимальных потерь, ч; $C_{э/э}$ – цена электрической энергии, руб./кВт·ч.

Исходя из вышесказанного, экономические критерии могут быть представлены в виде:

$$C_{кап} = C_{пров} + C_{опор} + C_{свет} \rightarrow \min \quad (8)$$

$$Z_{экспл} = \Delta P \cdot \tau_{max} \cdot C_{э/э} \rightarrow \min \quad (9)$$

Следует отметить, что экономический критерий включает в себя электротехнический, так как при уменьшении потерь мощности в сети затраты на потери электроэнергии будут снижаться пропорционально.

В связи с этим предлагается при известном графике работы уличного освещения использовать экономический критерий, а при отсутствии указанных сведений вместо него использовать электротехнический критерий.

Под светотехническим критерием в данной работе понимаем освещаемую площадь улицы и прилегающей к ней территории D . Выбор данного значения в качестве критерия связан с тем, что для обеспечения безопасности и улучшения комфорта жизнедеятельности горожан при проектировании СУО следует стремиться к максимальному увеличению освещаемой площади улиц и прилегающих территорий при соблюдении нормативных показателей освещенности E .

Как известно, значение освещаемой площади зависит от количества светильников в СУО [2]. В рамках решения поставленной задачи под площадью, освещаемой одним светильником, понимаем площадь участка освещаемой дороги, тротуара и т.п., на которой рассматриваемый светильник обеспечивает освещенность равную или большую нормативной.

Исходя из сказанного, светотехнический критерий может быть формализован в виде

$$D = l \cdot A \cdot n (P[n] \neq 0) \rightarrow \max, \quad (10)$$

где l – расстояние между светильниками, м; A – ширина освещаемой дороги, тротуара и т.п., м.

4. Целевая функция

В связи с тем, что критерии оптимизации являются разнородными, в работе для формирования целевой функции предлагается использовать метод скаляризации [16], согласно которому оптимальное решение определяется по максимальному значению суперкритерия C' :

$$C'(x) \rightarrow \max, \quad (11)$$

где $x=(x_1, x_2)$ – вектор искомых величин (сечение проводника, количество светильников).

Алгоритм определения суперкритерия (свертка критериев) представлен ниже.

5. Граничные условия задачи оптимизации:

– длительно допустимый ток проводников. Согласно ПУЭ[1], все проводники должны удовлетворять условию проверки по длительно допустимому току:

$$I_{\max} \leq I_{\text{дл.доп}}, \quad (12)$$

где I_{\max} – максимальный рабочий ток в проводнике, А; $I_{\text{дл.доп}}$ – длительно допустимый ток для выбранного сечения проводника, А.

С учетом разработанной математической модели СУО, ток, протекающий по каждому из участков сети, определяется как

$$I_{k,j} = \frac{S_{k,j}}{U_k}, \quad (13)$$

где $S_{k,j}$ – мощность протекающая по ветви, соединяющей узлы k и j , ВА; U_k – напряжение в узле k , В.

Следовательно, первое граничное условие

$$\frac{S_{k,j}}{U_k} \leq I_{\text{дл.доп}}, \quad (14)$$

– потери напряжения в осветительной сети. Согласно ПУЭ и правилам проектирования уличного освещения, потери напряжения у наиболее удаленного светильника не должны превышать 5%.

Отсюда второе граничное условие:

$$\Delta U = \frac{U_1 - \min(U[n])}{U_1} \leq 5\%, \quad (15)$$

где U_1 – напряжение источника питания, В;

– дополнительным ограничением является дискретный характер искомых величин – сечения проводников могут выбираться только из стандартного ряда, а число светильников может быть только целой величиной.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОДНИКА И КОЛИЧЕСТВА СВЕТИЛЬНИКОВ В СУО

Рассмотрим задачу поиска оптимального значения сечения проводников осветительной сети и количества светильников в ней, обеспечивающих минимальные капитальные и эксплуатационные расходы на СУО одновременно с максимальной освещаемой площадью. В качестве заданных значений принимаются активная и реактивная мощности светильников ($P_{\text{св}}$, $Q_{\text{св}}$), остающиеся неизменными при изменении количества светильников, а также расстояние между светильниками, определенное светотехническим расчетом.

Искомыми переменными являются:

- сечение проводника осветительной сети F ; от выбранного сечения зависят $I_{\text{дл.доп}}$, $r_{\text{уд}}$, $x_{\text{уд}}$
- количество светильников n .

Ввиду того, что сечения проводников определены стандартным рядом, первым шагом формирования альтернатив является выбор типа проводника и его сечения, для которого определяются удельное сопротивление и его стоимость. Затем производится расчет режима осветительной сети с последовательным увеличением числа светильников в ней и проверкой выполнения граничных условий. Для каждого значения n формируется своя альтернатива, в результате получаем множество альтернатив: $F: n (Z_{\text{кап}}, Z_{\text{экспл}}, D)$.

Алгоритм формирования альтернатив представлен на рис. 3. Так как значения критериев оптимизации являются разнородными величинами (единицы измерения затрат – рубли, а освещаемой площади – м²), к тому же значения эксплуатационных и капитальных затрат могут значительно отличаться друг от друга, предлагается провести, как указано в работах [17-20], нормирование значений критериев оптимизации. Для минимизируемых критериев оптимизации используем формулу

$$c_{\text{норм}} = \frac{c_{\max} - c_i}{c_{\max} - c_{\min}}. \quad (16)$$

Для максимизируемых:

$$c_{\text{норм}} = \frac{c_i - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}}, \quad (17)$$

где c_{\max} – значение критерия оптимизации у лучшего с точки зрения данного критерия варианта; c_{\min} – значение критерия оптимизации у худшего с точки зрения данного критерия варианта; c_i – значение критерия оптимизации у рассматриваемого варианта.

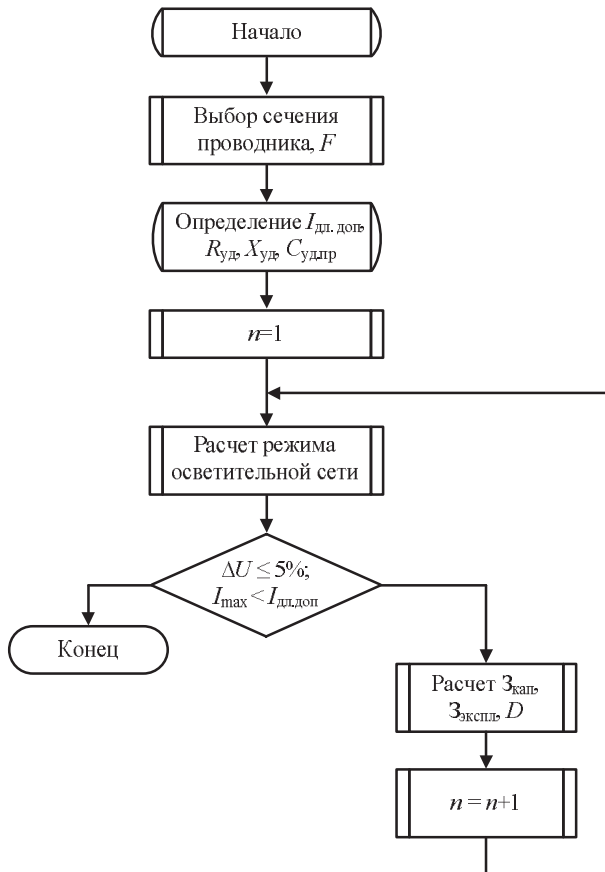


Рис. 3. Алгоритм формирования альтернатив

На следующем шаге определяются веса критериев. Вес критерия – это не что иное, как степень важности критерия по сравнению с остальными. В общем случае при решении рассматриваемой задачи предлагается веса критериев принимать равными. Однако возможны ситуации, при которых тот или иной критерий оказывается важнее. Например, с увеличением срока эксплуатации СУО критерий эксплуатационных затрат может быть более важен, чем критерий капитальных затрат. Для временных сетей ситуация прямо противоположна. При отсутствии иных источников питания более важным может становиться критерий максимизации освещаемой площади. В связи с этим веса критериев должны определяться проектировщиком СУО для каждого конкретного случая.

Для сведения нескольких критериев к одному суперкритерию можно использовать два различных метода свёртки: аддитивный и мультипликативный [21].

Аддитивная свёртка осуществляется по формуле

$$c(x) = p_1 \cdot c_1 + p_2 \cdot c_2 + \dots + p_n \cdot c_n \quad (18)$$

Мультипликативная свёртка осуществляется по формуле

$$c(x) = c_1^{p_1} \cdot c_2^{p_2} \cdot \dots \cdot c_n^{p_n} \quad (19)$$

где c_1, c_2, \dots, c_n – значения критериев оптимизации; p_1, p_2, \dots, p_n – веса соответствующих критериев.

Отличием методов свертки является то, что аддитивная свёртка предполагает возможность компенсации низких оценок по одному из критериев высокими оценками по другим критериям, мультипликативная свёртка не допускает такого варианта, так как низкая оценка по одному из критериев существенно снизит

значение всего произведения. Так как используемые при оценке критерии являются разнородными, компенсация одного из критериев другим вряд ли представляется возможной. В связи с этим предполагается, что использование мультипликативной свёртки для данной задачи более целесообразно.

Рассмотрим решение задачи выбора оптимального сечения проводника для простейшей осветительной сети без ответвлений (рис. 1, б). Необходимо выбрать сечение проводника осветительной сети, при котором возможно освещать максимальную площадь с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами. Расстояние между опорами освещения по светотехническому расчету – 30 м. В качестве нагрузки были приняты светильники РКУ-250 с номинальной мощностью 250 Вт и $\cos \phi = 0,8$. В качестве проводника – самонесущий изолированный провод СИП-2, параметры которого представлены в табл. 1. Стоимость опор уличного освещения принята равной 10200 руб., стоимость светильника 2150 руб. Для каждого из сечений по алгоритму, представленному на рис. 3, формируются альтернативные варианты сети уличного освещения с различным количеством светильников. Максимальное количество светильников лимитировано граничными условиями. Эксплуатационные затраты определялись исходя из времени работы уличного освещения в 4010 ч в год, и цены на электрическую энергию в 2,94 руб./кВт·ч.

Результаты расчетов выборочно представлены в табл. 2. После вычисления значений критериев оптимизации для каждой из альтернатив производилось нормирование и свёртка критериев. Зависимости значения суперкритерия от числа светильников в СУО при различных сечениях проводника представлены на рис. 4 и 5.

Полученные результаты позволяют заключить следующее:

- подтверждено выдвинутое раннее утверждение о том, что использование мультипликативной свёртки для решения задачи поиска оптимального сечения осветительной сети является более предпочтительным;
- определены оптимальные количества светильников в СУО для каждого сечения проводника: при количестве светильников до 9 целесообразнее использовать сечение провода 16 мм², при 10: сечение 25 мм², при 11-12: 35 мм², а при большем количестве светильников – сечение 50 мм².

Разработанный авторами подход к определению оптимального сечения проводника и количества светильников СУО, как к многокритериальной оптимизационной задаче, является универсальным, т.к. позволяет определить наилучшие варианты параметров элементов СУО и ее режима работы не только при различных сечениях проводников, но и при использовании различных светильников, опор и прочих комплектующих СУО при внесении корректировки в математические модели критериев оптимизации.

Таблица 1

Параметры проводников

Сечение, мм ²	$R_{уд}$, Ом/км	$X_{уд}$, Ом/км	$C_{уд. пров.}$, руб./км	$I_{дл.доп.}$, А
16	1,91	0,0865	60620	100
25	1,38	0,0827	74710	130
35	0,986	0,0802	98420	160
50	0,72	0,0794	134180	195

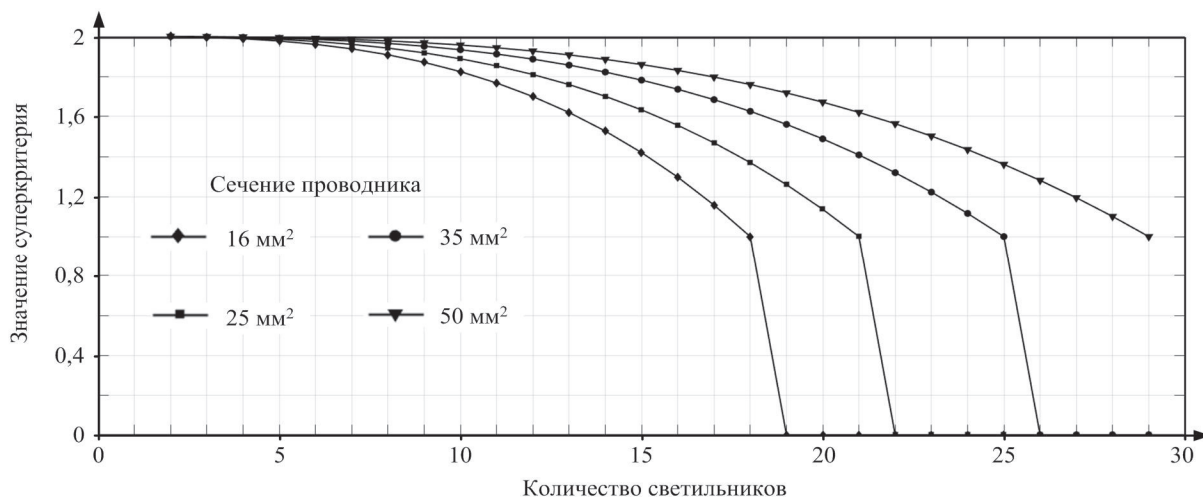


Рис. 4. Значения суперкритерия при аддитивной свёртке

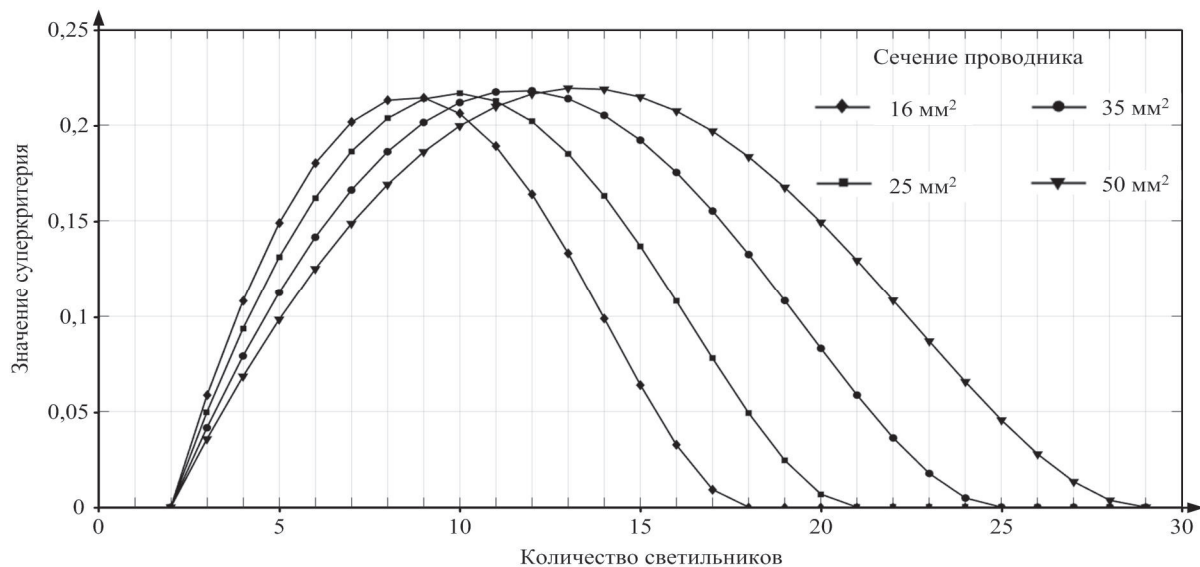


Рис. 5. Значения суперкритерия при мультипликативной свёртке

Таблица 2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчета критериев оптимизации для альтернативных вариантов осветительной сети

Кол-во светильников		2	..	18
Критерий	Сечение проводника, мм ²			
Эксплуатационные затраты, руб./год	16	6,24	..	2725,7
	25	4,51	..	1949,9
	35	3,22	..	1383,2
	50	2,35	...	1005,2
Капитальные затраты, руб	16	28337	...	255034
	25	29182	..	262643
	35	30605	..	275446
	50	32750	..	294757
Освещаемая площадь, м ²	16	180	..	1620
	25	180	..	1620
	35	180	..	1620
	50	180	..	1620

1. Предложен графоаналитический подход к расчету освещения, основанный на представлении топологии осветительной сети в виде матрицы соединений и матричном задании ее основных параметров. Данный подход позволяет рассчитывать токи в ветвях и напряжения в узлах СУО, тем самым позволяя оценивать все параметры ее функционирования.

2. Формализованы граничные условия задачи оптимизации СУО, основанные на требованиях нормативных документов, определены и обоснованы такие критерии оптимизации, как минимизация капитальных затрат на создание СУО, минимизация эксплуатационных затрат и потерь мощности в сети, максимизация освещаемой площади. Разработан алгоритм формирования альтернатив по выбору оптимального сечения проводников и количества светильников в СУО, удовлетворяющих граничным условиям задачи оптимизации.

3. Для выбора наилучшей альтернативы предложено использовать метод скаляризации, включающий в себя следующие операционные действия: нормирование критериев оптимизации; выбор весов критериев; мультипликативная свертка. Отмечено, что разработанный подход к определению оптимального сечения проводников и количества светильников СУО является

универсальным, т.к. позволяет определить оптимальные варианты параметров элементов СУО и ее режима работы не только при различных сечениях проводников, но и при использовании различных светильников, опор и прочих комплектующих СУО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. СПб.: УВЦИЗ, 2005.
2. СН 541-82. Инструкция по проектированию наружного освещения городов, поселков и сельских населенных пунктов. Взамен: ВСН 22-75, СН 407-70, введ.01-07-82. М.: Госстрой СССР, 1982. – 97 с.
3. Сапрыка А. В., Черенков А. В. Модернизация осветительных систем города // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2015. №4 (135). С. 2-6.
4. Леонова Ю. В. Автоматизированная система управления уличным освещением Новосибирска //Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. С. 163-169.
5. Валиуллин К. Р. Анализ способов управления уличным освещением по различным критериям // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V междунар. техн. конф., г. Томск, 10-14 ноября 2014 г. / Мин-во образования и науки РФ, Томский политехнический университет. Томск, 2014. Т. 2. С. 275-279.
6. Варганова А. В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. №3. – С.76-82.
7. Дерзский В. Г., Скиба В. Ф. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2009. №6. С.55-58.
8. Ляпин В.С., Разуваева Т.С., Филиппова К.В. Исследование режимов работы линии уличного освещения при увеличении сечения проводов, замене светильников, установке конденсаторов //Actualscience. 2016. Т. 2. №.12. С. 167-168.
9. Энергоэффективность уличного освещения при внутреннем симметрировании и доведения коэффициента реактивной мощности до нормативного значения / Троицкий А.И., Костинский С.С., Ляпин В.С., Разуваева Т.С., Филиппова К.В. // Изв. вузов. Электромеханика. 2016. №3. С. 61-68.
10. Преимущества и недостатки ретрофита уличного освещения при установке светодиодных светильников, а также их влияние на потери активной мощности в трансформаторах распределительных сетей / Троицкий А.И., Костинский С.С., Власенко В.И., Химичев Т.З. // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2016. 2. С. 53-61.
11. Повышение энергоэффективности работы линий уличного освещения при проведении мероприятий по доведению коэффициента реактивной мощности до нормативного значения / Троицкий А.И., Костинский С.С., Филиппова К.В., Пасечная Д.С. // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: материалы 13-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 25 июня 2015 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ). Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2015. С. 69-73.
12. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: Изд -во НИЦ ЭНАС, 2006. 320 с.
13. Валиуллин К.Р., Семенова Н.Г. Сравнение моделей нагрузок при расчете осветительных сетей // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докл. 6-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках специализир. форума «Expo BuildRussia». Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2017. С. 186-199.
14. Козловская В.Б., Калечиц В.Н. Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием. Часть 1 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. №6 С. 549-562.
15. J.A. Lobão, T. Devezas, J.P.S. Catalão, Energy efficiency of lighting installations: Software application and experimental validation, Energy Reports, Volume 1, 2015, pp. 110-115. ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyр.2015.04.001>
16. Geoffrion A.M. Bicriterion Mathematical Programming // Operational Research. 1967. V. 15, 1. P. 39-54.
17. Дьяченко Ю.А. Выбор средств обеспечения надежности электроснабжения птицефабрики по многокритериальной модели // Электрика. 2008. № 5. С. 31-36.
18. Лещинская Т.Б. Применение методов многокритериального выбора при оптимизации систем электроснабжения сельских районов // Электричество. 2003. № 1. С. 14-22.
19. Магадеев Э.В., Лещинская Т.Б. Методика выбора оптимального варианта повышения надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. М.: МГАУ, 2008. 110 с.
20. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления и приложения. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.
21. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: учеб. пособие. М. : Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 316 с.

Поступила в редакцию 14 мая 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF STREET LIGHTING NETWORK ELEMENTS

Kamil' R. Valiullin

Assistant Professor, Department of Electrical and Thermal Power Engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: ValiullinKamil91@gmail.com.

Nanatiya G. Semenova

D.Sc. (Pedagogics), Professor, Department of Automated Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: tomsk@house.osu.ru.

The article considers the issue of increasing the energy efficiency of street lighting networks by optimizing of parameters of their elements, the supply conductor section and the number of luminaires in the street lighting network. A substitution circuit for the street lighting network and its mathematical model based on the graphoanalytical method for calculating regime parameters

are proposed. The problem of optimizing the configuration of the lighting network is formulated, and its boundary conditions defined by regulatory documents are formalized. As the optimization criteria, the criteria for minimizing the capital and operating costs and maximizing the illuminated area are proposed. To solve the task of finding the optimal balance

between minimizing the costs of building and operating a lighting network and maximizing the illuminated area, the research group proposed the method of scalarization that makes it possible to reduce heterogeneous criteria to one supercriteria by normalization and convolution. An algorithm is proposed for the formation of alternative lighting network options taking into account the boundary conditions specified by regulatory documents with the help of which alternatives to the lighting network for different conductor sections were formed, the values of the optimization criteria for each of the variants were calculated. The analysis of the obtained results showed that for the considered problem it is necessary to use the multiplicative convolution of the criteria. The developed approach allows us to solve the problem of determining the optimum section of the conductor of the lighting network with a certain number of luminaires, and also the inverse problem of finding the optimum number of luminaires in a street lighting network for a given section conductor. It is noted that the proposed algorithm can also be used to select the optimal luminaires, supports and other elements of the street lighting network, taking into account the characteristics of these elements in the optimization criteria.

Keywords: electric street lighting network, optimization of the electrical network configuration, loss reduction, energy efficiency.

REFERENCES

1. *Pravila ustroystva elektroustanovok* [Rules for the installation of electrical installations] (PUE). 7 th ed. St. Petersburg: UVSIZ, 2005. (In Russian)
2. SN 541-82. *Instruktsiya po proektirovaniyu naruzhnogo osvещeniya gorodov, poselkov i selskikh naselyennykh punktov* [Instruction on the design of outdoor lighting of cities, towns and rural settlements]. In substitution of: VSN 22-75, SN 407-70, introduced.01-07-82. Moscow: Gosstroy USSR, 1982. 7 p. (In Russian)
3. Sapryka A.V., Cherenkov A.V. Modernization of lighting systems of the city. *Energoberezhenie. Energetika. Ergoaudit*. [Energy saving. Power engineering. Energy audit], 2015, no. 4 (135), pp. 2-6. (In Russian)
4. Leonova Yu.V. Automated street lighting control system in Novosibirsk. *Vychislitelnye tekhnologii* [Computational technologies]. 2013, vol. 18, pp. 163-169. (In Russian)
5. Valiullin K.R. Analysis of ways to control street lighting by various criteria. *Elektroenergetika glazami molodezhi: nauchnye trudy V mezhdunarodnoy tekhnicheskoy konferentsii* [Power engineering through the eyes of youth: scientific works of international technical conference], Vol. 2., Tomsk, November 10-14, 2014 / Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Tomsk Polytechnic University. Tomsk, 2014, pp. 275-279. (In Russian)
6. Varganova A.V. About methods of optimization of operating modes of electric power systems and networks. *Vestnik URGU* [Bulletin of SUSU]. Series: Power. 2017, no. 3, pp. 76-82. (In Russian)
7. Derzsky V.G., Skiba V.F. Choice of measures to reduce power losses in distribution networks. *Energoberezhenie. Energetika. Ergoaudit*. [Energy saving. Power engineering. Energy audit]. 2009, no. 6, pp. 55-58. (In Russian)
8. Lyapin V.S., Razuvaeva T.S., Filippova K.V. Investigation of operating modes of the street lighting line with increasing cross-section of wires, replacement of luminaires, installation of capacitors. *Actual science*. 2016, vol. 2, no. 12, pp. 167-168. (In Russian)
9. Troitsky A.I., Kostinsky S.S., Lyapin V.S., Razuvaeva T.S., Filippova K. V. Energy efficiency of street lighting with internal symmetry and bringing the reactive power factor to the normative value. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics]. 2016, no. 3, pp. 61-68. (In Russian)
10. Troitsky A.I., Kostinsky S.S., Vlasenko V.I., Khimishchev T.Z. Advantages and disadvantages of retrofit street lighting when installing LED light fixtures, as well as their effect on the loss of active power in distribution network transformers. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region.: Tekhnicheskie nauki* [News of higher educational institutions. North-Caucasian region. Series: Engineering]. 2016, no. 2, pp. 53-61. (In Russian)
11. Troitsky A.I., Kostinsky S.S., Filippova K.V., Pashechnaya D.S. Improving the energy efficiency of street lighting during the implementation of measures to bring the coefficient of reactive power to the standard value. *Sovremennye energeticheskie sistemy i komplekсы i upravlenie imi: materialy 13 Mezhdunarodnoy naucho-prakticheskoy konferentsii* [Modern energy systems and complexes and their management: materials of the 13th International. scientific-practical. Conf.], Novochoerkassk, June 25, 2015. South-Russian. State. Polytechnical. Un-t (NPI). Novochoerkassk: YURPU (NPI), 2015, pp. 69-73. (In Russian)
12. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey* [Handbook on the design of electrical networks]. Edited by D.L. Faybisovich. Moscow, 2006. 320 p. (In Russian)
13. Valiullin K.R., Semenova N.G. Comparison of load models in the case of lighting networks. *Effektivnoe i kachestvennoe snabzhenie i ispolzovanie elektroenergi: sbornik dokladov mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii v ramkah foruma "Expo BuildRussia"* [Effective and qualitative supply and use of electricity: scientific works of 6th international scientific-practical conference in the framework of a specialist forum "Expo BuildRussia"]. Ekaterinburg: Publishing house UMC UPI, 2017, pp. 186-199. (In Russian)
14. Kozlovskaya V.B., Kalechits V.N. Calculation of regime parameters of the outdoor lighting line with two-way power supply part 1. *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh obyedinenij SNG*. [Power engineering. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS]. 2016, no. 6, pp. 549-562. (In Russian)
15. Lobão J.A., Devezas T., Catalão J.P.S., Energy efficiency of lighting installations: Software application and experimental validation, *Energy Reports*, vol. 1, 2015, pp. 110-115, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2015.04.001>
16. Geoffrion A.M. Bicriterion Mathematical Programming. *Operational Research*. 1967, vol. 15, no. 1, pp. 39-54.
17. Dyachenko Yu.A. The choice of means to ensure the reliability of power supply of a poultry farm on a multi-criteria model. *Elektrika* [Electrical engineering]. 2008, no. 5, pp. 31-36. (In Russian)

-
18. Leschinskaya T.B. Application of multicriteria-choice methods for optimization of power supply systems in rural areas. *Electrichestvo* [Electricity], 2003, no. 1, pp. 14-22. (In Russian)
 19. Magadeyev E.V., Lechinskaya T.B. *Metodika vybora optimalnogo varianta povysheniya nadyezhnosti elektrosnabzheniya selskokhozyaystvennykh potrebiteley* [Technique of choosing the optimal option for improving the reliability of electricity supply to agricultural consumers]. Moscow: MGAU, 2008. 110 p. (In Russian)
 20. Stoyer R. *Mnogokriterialnaya optimizatsiya: teoriya, vychisleniya i prilozheniya* [Multicriteria optimization: theory, calculations and applications]. Moscow: Radio and Communication, 1992. 504 p. (In Russian)
 21. Yakhyaeva G. E. *Nechetkie mnozhestva i neyronnye seti* [Fuzzy sets and neural networks]: Textbook. Moscow: Internet-University of Information Technologies; BINOMIAL. Laboratory of Knowledge, 2006. 316 p. (In Russian)
-

Валиуллин К.Р., Семенова Н.Г. Оптимизация параметров элементов сети уличного освещения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 3(40). С. 34-41. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-34-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-34-41)

Valiullin K.R., Semenova N.G. Optimization of Parameters of Street Lighting Network Elements. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3(40), pp. 34-41. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-34-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-34-41)
