

Валиуллин К.Р.

Оренбургский государственный университет

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

В статье предлагается использовать метод имитационного моделирования для анализа работы электротехнических систем уличного освещения в течение длительных промежутков времени. Предложены математические модели осветительной сети на основе итерационного метода расчета режима работы электрической сети и светотехнической части установки уличного освещения, основанная на точечном методе расчета освещенности. Предложенные модели реализованы в виде m -функций на языке MatLab и в виде функциональных блоков среды Simulink. Также реализованы алгоритмы управления системой уличного освещения, учитывающие изменение во времени естественной освещенности и интенсивности дорожного движения. Разработанная модель позволяет сравнивать между собой параметры режима электротехнических систем уличного освещения различной конфигурации, тем самым позволяя сравнивать между собой различные проектные решения и варианты модернизации. Кроме того, предложенная модель может быть использована для оценки энергосберегающего эффекта при различных алгоритмах управления режимом работы электротехнической системы уличного освещения.

Ключевые слова: имитационное моделирование, электротехническая система уличного освещения, MatLab, Simulink, уличное освещение.

ВВЕДЕНИЕ

В составе электротехнической системы любого города можно выделить электротехнические системы уличного освещения (ЭС УО). В контексте данной работы под ЭС УО понимается совокупность источника питания, осветительной сети, установок уличного освещения с устройствами управления их режимом работы.

Также составляющей частью системы уличного освещения можно считать освещаемое пространство [1], так как его характеристики существенно влияют на выбор установок уличного освещения и требования к режиму их функционирования.

Стоит отметить, что системы уличного освещения являются достаточно энергоемкими. Например, по данным управления жилищно-коммунального хозяйства г. Оренбурга, затраты электроэнергии на нужды уличного освещения составляют порядка 10% от суммарных затрат электроэнергии на нужды ЖКХ. Для уменьшения энергопотребления ЭС УО в различных работах предлагаются следующие мероприятия: замена светильников на более энергоэффективные [2, 3], внедрение систем управления уличным освещением [4, 5], реконструкцию осветительных сетей [6].

Все вышеперечисленные мероприятия предполагают изменения компонентного состава существующих ЭС УО, что влечет за собой следующие сложности:

- высокая стоимость внесения изменений в ЭС УО. Реконструкция систем уличного освещения является крупнозатратным мероприятием, планирование которого должно осуществляться заранее. При недостаточной проработке проекта возможна ситуация, когда внесение изменений в ЭС УО приводит к ухудшению ее работы, но, так как денежные средства были потрачены, обратная замена не производится. В связи с этим необходим механизм проверки эффективности тех или иных изменений в ЭС УО;

- сложность апробации различных алгоритмов управления режимом работы ЭС УО. Внедрение авто-

матизированных систем управления уличным освещением (АСУ УО) является дорогостоящим мероприятием, но в то же время может обладать низкой эффективностью и высоким сроком окупаемости. При этом тестирование различных алгоритмов управления на реальном объекте может приводить к снижению комфорта жителей города. Также возможны случаи, при которых дорогостоящие АСУ УО оказываются неэффективными в данных условиях, а узнать об этом возможно только в процессе эксплуатации [7];

- зависимость функционирования ЭС УО от времени года. В связи с тем, что потребление энергии ЭС УО существенно зависит от продолжительности светового дня, а значит, и от времени года [8], достоверно оценить эффективность любых изменений можно только сравнивая годовые периоды эксплуатации;

- большой территориальный охват ЭС УО. Если для оценки энергопотребления ЭС УО можно использовать данные счетчиков электрической энергии, то оценка освещенности, создаваемой осветительными установками, требует большого количества измерений, производимых в течение большого промежутка времени, что является труднореализуемым.

В настоящий момент вышеперечисленные проблемы решаются, как правило, апробацией на небольшом участке улицы города. Этот метод даёт достоверные результаты, но требует существенных денежных и временных затрат, что затрудняет сравнение различных вариантов модернизации и выбор наиболее оптимального для данных условий.

В связи с этим для оценки эффективности внесения тех или иных изменений в ЭС УО и выбора наилучшего варианта развития автором предлагается использовать имитационное моделирование ЭС УО.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Имитационным моделированием называется метод исследования, при котором реальный объект заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей рассматриваемую систему. Имитационная модель является логико-математическим описанием рассматриваемого объекта, которое может быть использовано

для экспериментирования на ЭВМ с целью анализа и оценки функционирования объекта в различных режимах работы, при различных внешних воздействиях и любых сочетаниях свойств рассматриваемого объекта.

Для ЭС УО имитационное моделирование обладает следующими преимуществами:

- низкая стоимость;
- быстрота получения результата моделирования;
- возможность выбора наилучшего варианта модернизации, реконструкции ЭС УО;
- возможность оценки работы ЭС УО в динамике.

В существующих исследованиях рассмотрены вопросы моделирования процессов в отдельных компонентах систем уличного освещения: тепловых процессов в светодиодных светильниках [9], функционирования ЭС УО с питанием от солнечных панелей [10], процесса передачи управляющих сигналов [11], светораспределения светодиодных светильников [12]. Но при этом автору неизвестны работы, в которых рассмотрено имитационное моделирование функционирования всех компонентов ЭС УО. В связи с этим создание имитационной модели ЭС УО, учитывающей взаимосвязи всех ее элементов, является актуальной научной задачей. В качестве инструмента моделирования была выбрана среда Simulink математического пакета MatLab.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭС УО

Как было отмечено ранее, в ЭС УО можно выделить следующие компоненты:

- источник питания;
- осветительная сеть;
- установки уличного освещения;
- устройства управления режимом работы ЭС УО;
- коммутационные устройства;
- освещаемые поверхности.

Логика взаимодействия между указанными компонентами представлена на **рис. 1**.

Источник питания

При моделировании источников питания электротехнических систем могут применяться два варианта моделей источников питания - с учетом и без учета внутреннего сопротивления источника. Модель, учитывающая внутреннее сопротивление источника питания является более точной, так как учитывает падение напряжения на самом источнике при высоких токах нагрузки.

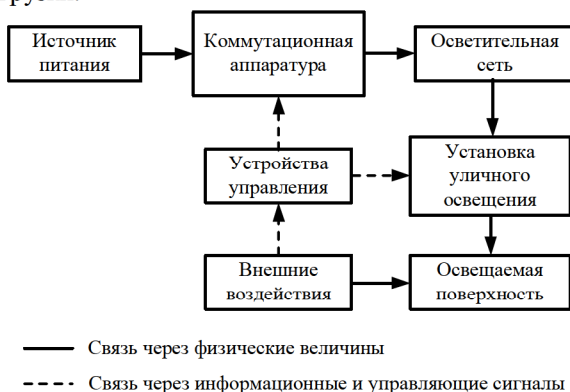


Рис. 1. Логика взаимодействия элементов имитационной модели

Однако питание ЭС УО, как правило, осуществляется от шин трансформаторных подстанций 6(10)/0,4 кВ городских электрических сетей, причем осветительная нагрузка не является единственной для данной трансформаторной подстанции. В связи с этим необходимо учитывать в имитационной модели влияние прочей нагрузки источника питания либо учитывать его величиной напряжения на шинах 0,4 кВ трансформаторной подстанции таким образом, чтобы в величине этого напряжения было уже учтено падение напряжения на самом трансформаторе, вызванное нагрузкой, отличной от нагрузки ЭС УО.

Таким образом, наиболее целесообразно источник питания в имитационной модели представлять в виде идеального источника без внутреннего сопротивления, но при этом напряжение источника должно соответствовать напряжению на шинах 0,4 кВ питающей трансформаторной подстанции и учитывать падение напряжения на сопротивлении трансформатора от прочей подключенной нагрузки.

Осветительная сеть

Осветительные сети могут быть как однофазными, так и трехфазными.

При трехфазном исполнении установка уличного освещения (УУО) подключается к фазе *A*, следующая к фазе *B* и затем к фазе *C*. Далее такое чередование фаз сохраняется. Трехфазное исполнение осветительной сети позволяет увеличить ее протяженность, уменьшить расходы на отдельные проводники.

Так как в работе не рассматриваются быстропротекающие и аварийные процессы, то целесообразно рассматривать только одну из фаз, предполагая, что сеть работает в симметричном режиме и распределение токов и напряжений в остальных фазах будет аналогичным.

Для создания имитационной модели осветительной сети необходимо определить, какие данные являются исходными для моделирования, а какие изменяются в процессе работы сети и должны быть найдены.

Для существующих и вновь проектируемых сетей освещения известными являются тип и сечение используемых проводников, конфигурация осветительной сети, представляющая собой места расположения УУО и их присоединения, а также мощность используемых УУО. Искомыми данными является распределение токов по отдельным участкам осветительной сети и напряжения в местах подключения УУО. Таким образом, для имитационной модели ЭС УО необходимо создание математической модели, позволяющей по исходным данным рассчитывать режим работы осветительной сети.

При создании математической модели приняты следующие допущения:

- в связи с тем, что осветительные сети выполняются на низком напряжении, поперечные проводимости проводников сети не учитываются ввиду своих малых значений [13];

- нагрузка представлена моделью постоянной мощности с линейной зависимостью потребляемой мощности от напряжения. При рассмотрении работы ЭС УО в рабочих режимах с отклонением напряжения не более, чем на $\pm 10\%$ от номинального, данное допу-

щение не окажет существенного влияния на точность расчетов, так как зависимость потребляемой мощности газоразрядных, люминесцентных и светодиодных источников света, применяемых в ЭС УО от напряжения, является линейной [14];

– не рассматриваются сети уличного освещения с двухсторонним питанием и сети с замкнутой конфигурацией в виду их редкого использования.

Математически топологию осветительной сети можно представить в виде матрицы с размерностью $[n \times n]$, где n – количество узлов в сети. Узлами считаются – место подключения источника питания и места подключения УУО и разветвления осветительной сети. В том случае, если узлы под номерами k и j связаны непосредственно друг с другом, то $C(j,k)=1$, в ином случае $C(j,k)=0$. Аналогичным образом с помощью матрицы могут быть заданы значения длин и сопротивлений отдельных участков сети. УУО задаются в виде векторов электрической нагрузки $S[n]$, $P[n]$, $Q[n]$, где каждый элемент вектора представляет нагрузку в узле с соответствующим номером. Режим работы сети характеризуется матрицей токов ветвей $I[n \times n]$ и вектором напряжений в узлах сети $U[n]$.

Предложенный подход позволяет задавать сети различных конфигураций с различными типами нагрузок и сопротивлениями между узлами сети. Пример участка ЭС УО между узлами j и k представлен на рис. 2.

В связи с тем, что осветительные сети содержат большое количество узлов и их токовая нагрузка на начальных и конечных участках различна, формализация классических методов расчета электрической цепи (метод контурных токов и узловых потенциалов) для данной задачи оказывается затруднительной. В связи с этим для расчета режима сети предлагается использовать итерационный метод расчета, показывающий достоверные результаты для сетей с односторонним питанием [15]. Достоинствами указанного метода является быстрая сходимость, высокая точность и простота формализации для сетей с односторонним питанием и большим количеством узлов нагрузки. Расчет происходит по следующему алгоритму:

1. На нулевой итерации расчета предполагается, что потери напряжения в сети равны нулю и напряжение в каждом из узлов равно напряжению источника питания. Исходя из этого предположения, рассчитываются токи каждой УУО:

$$I_{H_k}^{(0)} = \frac{S_k}{U_1}, \quad (1)$$

где S_k – полная мощность УУО с номером k , ВА; U_1 – напряжение на зажимах источника питания, В.

2. По первому закону Кирхгофа определяются токи и потоки мощностей в каждой из ветвей осветительной сети.

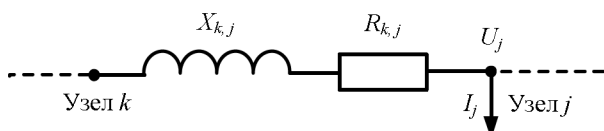


Рис. 2. Иллюстрация схемы замещения участка осветительной сети

3. Исходя из найденных значений токов и потоков мощностей, определяются падения напряжения в ветвях осветительной сети:

$$\Delta U_{k,j}^{(0)} = I_{k,j}^{(0)} R_{k,j} \cos \varphi_{k,j} + I_{k,j}^{(0)} X_{k,j} \sin \varphi_{k,j}, \quad (2)$$

где $I_{k,j}$ – ток, протекающий по участку, соединяющему узлы под номерами k и j , А; $R_{k,j}$, $X_{k,j}$ – активное и реактивное сопротивления участка осветительной сети между узлами под номерами k и j , Ом.

4. С учетом найденной величины падения напряжения уточняются величины напряжений в узлах:

$$U_j^{(1)} = U_j^{(0)} - \Delta U_{k,j}^{(0)}. \quad (3)$$

Затем вычисляется ошибка итерационного расчета:

$$\varepsilon = \frac{|\min(U^{(0)}) - \min(U^{(1)})|}{\min(U^{(0)})} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Если ошибка итерационного расчета больше заданного значения, то выполняется следующая итерация расчета с учетом найденных напряжений в каждом из узлов.

Описанная математическая модель расчета режима осветительной сети реализована в виде m -функции в среде MatLab и в виде функционального блока среды имитационного моделирования Simulink.

Светотехническая часть установки уличного освещения

Для анализа полезного эффекта от ЭС УО, под которым в данной работе понимается освещенность, создаваемая системой уличного освещения, необходимо разработать математическую модель электротехнической части ЭС УО, позволяющую определять распределение светового потока и освещенность на дороге или тротуаре.

Одним из наиболее точных и проверенных способов расчета освещенности является точечный метод расчета, позволяющий определять освещенность в любой точке пространства, исходя из координат УУО, их светового потока и кривой силы света.

В системах уличного освещения наиболее часто встречаются одностороннее (светильники A , B) и двухстороннее симметричное (добавляются светильники C , D , рис. 3) расположения УУО вдоль освещаемой дороги.

Для создания математической модели рассмотрим расположение светильников в трехмерном пространстве, при этом ось X направлена вдоль освещаемой дороги, ось Y – поперек, а ось Z – вертикально вверх.

Определим освещенность, создаваемую светильником A в точке X , считая известными следующие величины:

- световой поток F , создаваемый светильником A , лк;
- координаты расположения светильника относительно рассматриваемой точки – высота подвеса и расположение относительно дорожного полотна.

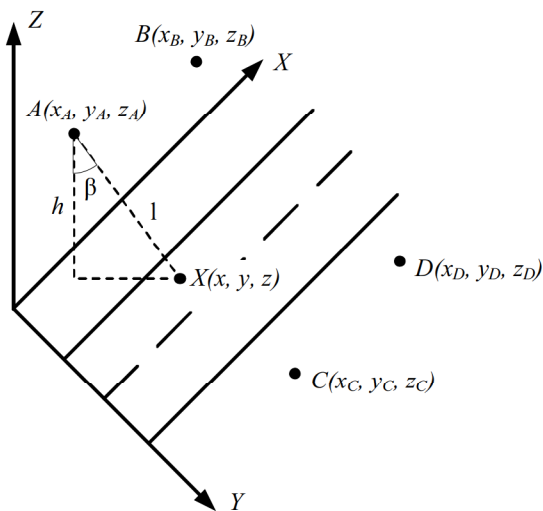


Рис. 3. Пример расположения светильников вдоль освещаемой дороги

При моделировании примем следующие допущения:

1. Осветительные установки считаем точечными источниками света, так как их линейные размеры малы по сравнению с высотой подвеса.

2. Не учитывается возможное падение светового потока светильников, вызванное их загрязнением, старением и другими причинами - все эти факторы могут быть учтены в величине светового потока $F_{ном}$.

3. Освещенность, создаваемая естественными источниками света, принимается постоянной для всех точек рассматриваемой поверхности.

Рассмотрим произвольную точку X , лежащую на освещаемой поверхности. Координаты точки X в общем виде $X(x, y)$. Согласно точечному методу расчета освещенность в этой точке можно найти по формуле

$$E = I_{\alpha} \frac{\cos \beta}{l^2} \cdot \frac{F_{ном}}{1000}, \quad (5)$$

где I_{α} – сила света источника в заданном направлении, Кд; $\cos \beta$ – косинус угла падения светового луча в заданную точку; l – расстояние до источника света, м; $F_{ном}$ – номинальный световой поток светильника, лм.

Рассмотрим осветительную установку в точке A . Для нее

$$l = \sqrt{z_A^2 + (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}, \quad (6)$$

где x_A, y_A, z_A – координаты светильника A .

$$\cos \beta = \frac{h}{l} = \frac{z_A}{\sqrt{z_A^2 + (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}}. \quad (7)$$

Сила света источника в заданном направлении определяется его кривой силы света (КСС) и зависит от угла β , под которым луч света падает на поверхность: $I_{\alpha} = f(\beta)$. При формализации задачи нахождения освещенности большую сложность представляет формализация кривой силы света. Как правило, КСС задаются в табличном виде, а промежуточные значения углов аппроксимируются.

Для наиболее часто встречающихся в системах уличного освещения светильников в литературе [14, 16-17] встречаются следующие аппроксимирующие формулы:

– для КСС типа Л

$$I_{\alpha}(\beta) = 154,8 \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(70 \cdot \sin^{1,2}(1,66\beta))}, \quad (8)$$

– для КСС типа Л-Ш

$$I_{\alpha}(\beta) = 119 \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(78,3 \cdot \sin^{1,4}(1,39\beta))}, \quad (9)$$

– для КСС типа Ш

$$I_{\alpha}(\beta) = 78,3 \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(84,4 \cdot \sin^{1,5}(1,2\beta))}. \quad (10)$$

Таким образом, формулы (8-10) позволяют формализовать задачу нахождения освещенности, создаваемой светильником A в точке X , согласно формуле (5).

Аналогичным образом можно найти освещенности, создаваемые остальными светильниками в окрестности рассматриваемой точки, и определить суммарную освещенность:

$$E = E_A + E_B + E_C + E_D + E_{ест}, \quad (11)$$

где $E_{ест}$ – освещенность, создаваемая естественными источниками света, лк.

Также в предлагаемой математической модели предлагается учитывать снижение светового потока используемых ламп в зависимости от приложенного напряжения [19]:

– для ламп типа ДРЛ

$$F = F_{ном} \left(3,26 \frac{U}{U_{ном}} - 2,26 \right), \quad (12)$$

где F – световой поток лампы при напряжении U , лм; $F_{ном}$ – номинальный световой поток лампы, лм; $U_{ном}$ – номинальное напряжение лампы, В;

– для люминесцентных ламп с пускорегулирующими аппаратами

$$F = F_{ном} \left(1,05 \frac{U}{U_{ном}} - 0,05 \right), \quad (13)$$

– для светодиодных ламп в рассматриваемом диапазоне напряжений заметного снижения светового потока не происходит [20].

Математическая модель была реализована в виде функционального блока в среде моделирования Simulink и позволяет получать значения освещенности на освещаемой поверхности при различных режимах работы УУО и значениях естественной освещенности.

Модель системы управления уличным освещением и изменения параметров окружающей среды

Различные алгоритмы управления уличным освещением представлены и подробно описаны в работах [8, 21-23]. С точки зрения имитационного моделирования модель должна иметь возможность изменения светового потока установок уличного освещения в процессе моделирования в зависимости от тех или иных внешних факторов. Изменение светового потока может

осуществляться путем изменения питающего напряжения для люминесцентных ламп либо с помощью ШИМ-модуляции для светодиодных светильников. При отсутствии плавного или ступенчатого регулирования имитационная модель должна иметь возможность включения и отключения установок уличного освещения по заданному графику.

В рамках исследования были реализованы следующие алгоритмы управления:

1) Ступенчатое управление по заданному временному графику [22]. В этом случае возможны только два состояния УУО – включенное и отключенное, переход между которыми осуществляется в заданное графиком время.

2) Ступенчатое управление по значению естественной освещенности. Принцип управления аналогичен предыдущему, но переход УУО из одного состояния в другое происходит при достижении определенного порога естественной освещенности.

3) Плавное управление по значению естественной освещенности. При указанном способе управления мощность УУО плавно увеличивается при снижении естественной освещенности в вечерний период, и снижается при повышении естественной освещенности в утреннее время. Указанный алгоритм рассмотрен автором в работе [8].

4) Плавное управление по значениям естественной освещенности и интенсивности дорожного движения, предложенное в статье [22]. Необходимая мощность УУО определяется аналогично предыдущему способу, а затем корректируется исходя из данных об интенсивности дорожного движения на рассматриваемом участке.

Для реализации описанных выше моделей системы управления уличным освещением в среде имитационного моделирования были реализованы следующие блоки:

- блок текущей даты и времени. Выходными значениями данного блока являются текущая дата и количество минут, прошедших с начала суток;

- блок расписания включения и отключения УУО. В данном блоке задаётся время включения и отключения УУО для каждого из дней периода симуляции работы системы уличного освещения;

- блок значений естественной освещенности, содержащий значения естественной освещенности по датам календарного года, полученные экспериментально;

- блок значений интенсивности дорожного движения на рассматриваемом участке дороги, содержащий сведения о количестве транспортных средств, проехавших по данному участку в обоих направлениях за промежутков времени в 10 минут;

- блок корректировки мощности УУО по значению прогноза интенсивности дорожного движения. Алгоритм работы этого блока описан автором в статье [23].

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И ЕЕ АПРОБАЦИЯ

Реализация модели была произведена в среде имитационного моделирования Simulink математического

пакета MatLab в виде отдельных блоков, представляющих собой компоненты электротехнической системы уличного освещения. Шаг моделирования принят равным одной минуте реального времени, таким образом, одни сутки симуляции работы включают в себя 1440 шагов симуляции. Рассмотрим отдельные составляющие части имитационной модели:

1) Модель осветительной сети. Входными сигналами для данного блока являются напряжение на источнике питания и сигнал, поступающий от системы управления мощностью УУО, представляющий собой рассчитанный уровень мощности УУО для данного момента времени в относительных единицах. Параметрами модели являются матрицы соединений, активных и реактивных сопротивлений ветвей осветительной сети, а также вектора активных и реактивных нагрузок в узлах осветительной сети. Эти данные могут быть заданы в табличном виде в рабочем пространстве математического пакета MatLab. Выходными значениями являются матрицы токов, протекающих по ветвям сети и напряжений в её узлах в каждый из моментов времени симуляции. Математическая модель данного блока описана ранее.

2) Блок, имитирующий светотехническую часть установки УУО. Входными параметрами блока являются текущее значение напряжения в месте подключения осветительной установки и значение естественной освещенности. Выходное значение – распределение освещенности на участке дороги между двумя ближайшими светильниками.

С помощью разработанных моделей отдельных компонентов ЭС УО возможно имитационное моделирование электротехнических систем уличного освещения с различными типами источников света, питающих проводов и любым расположением установок уличного освещения.

Разработанная имитационная модель апробирована посредством моделирования ЭС УО улицы Орской г. Оренбурга для различных алгоритмов управления.

На данном участке на железобетонных опорах СВ-95 установлены светильники с лампами типа ДнАТ-250 и широкой кривой силы света. Исполнение сети уличного освещения трёхфазное, расстояние между опорами уличного освещения – 30 м. В сети 30 установок уличного освещения (по 10 на каждую фазу), соединённых между собой проводом СИП-3 сечением 35 мм². Существующая система управления уличным освещением работает по заданному графику.

Для оценки возможностей имитационной модели было произведено сравнение функционирования ЭС УО при работе по заданному графику и при управлении по значению освещенности. За значение освещенности, при котором включаются УУО, было принято значение в 15 лк (люкс). Моделирование производилось для промежутка времени с 1 по 10 марта 2017 года. На **рис. 4** представлены графики изменения тока, потребляемого ЭС УО и освещенности (в логарифмическом масштабе) у наиболее удаленной установки уличного освещения для 9 марта.

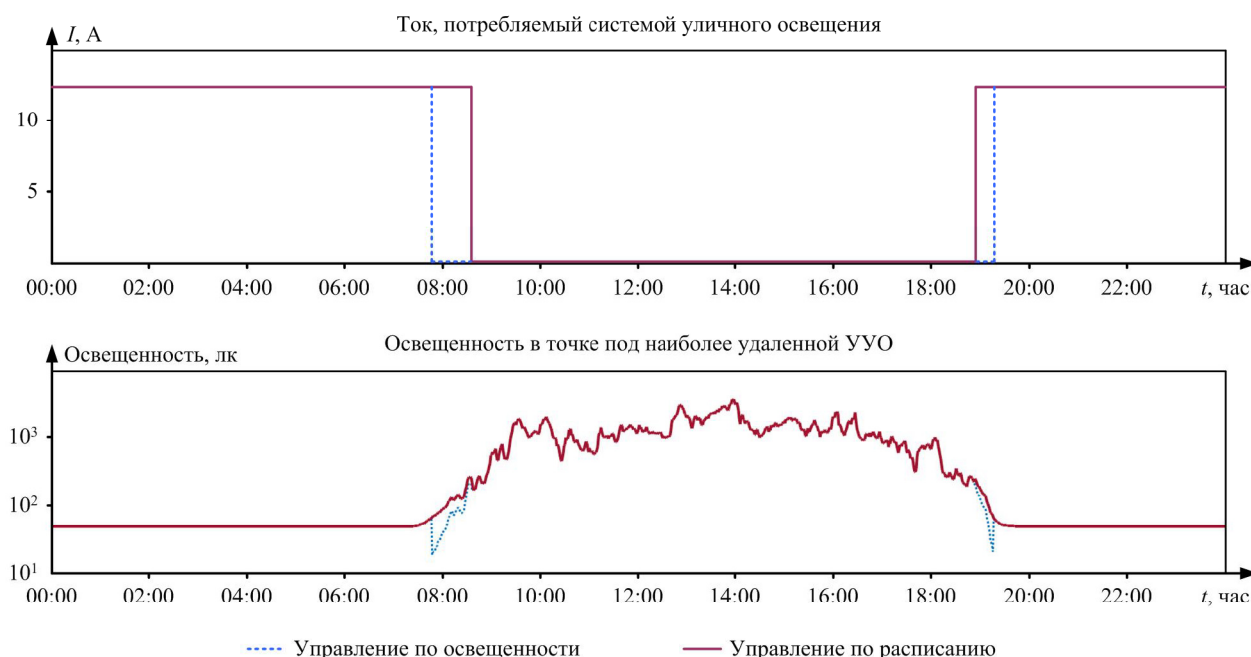


Рис. 4. Моделирование алгоритмов управления мощностью УУО с помощью предлагаемой имитационной модели

Полученные результаты позволяют оценить адекватность составленного графика включения и отключения УУО, а также соответствие нормативам освещенности. Из графиков на рис. 4 видно, что в случае управления по заданному графику обеспечивается более высокий, но избыточный уровень освещенности дорожного покрытия. Управление по освещенности в определенные моменты допускает снижение до минимально допустимого значения в 15 лк, что снижает энергопотребление ЭС УО. Также с помощью полученных данных было определено значение энергопотребления УУО за указанный промежуток времени. При управлении по заданному графику энергопотребление составило 376,14 кВт·ч, при управлении по освещенности – 352,03 кВт·ч (экономия составила 24,11 кВт·ч или 6,8%).

Таким образом, с помощью разработанной имитационной модели можно оценить экономию различных мероприятий по модернизации системы уличного освещения без их непосредственного внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для оценки эффективности решений по модернизации электротехнических систем уличного освещения разработана имитационная модель, включающая в себя источник питания, осветительную сеть, светотехническую модель установки уличного освещения и учитывающая взаимосвязь указанных компонентов.

2. Разработана и реализована в виде m -функции математическая модель электротехнической части ЭС УО, основанная на матричном представлении топологии осветительной сети и итерационном методе расчета параметров её режима.

3. Разработана и реализована в виде m -функции математическая модель светотехнической части ЭС УО, основанная на точечном методе расчета освещенности, учитывающая различные КСС источников света, используемых в ЭС УО и падение светового потока при изменении питающего напряжения.

4. В среде Simulink реализованы различные алгоритмы управления ЭС УО: управление по заданному графику, управление по значению естественной освещенности и интенсивности дорожного движения.

5. Предложенная обобщенная имитационная модель ЭС УО реализована в среде Simulink математического пакета MatLab и позволяет всесторонне оценивать работу ЭС УО по ее электротехническим и светотехническим параметрам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриленко В.Ю. Разработка и применение рационального уличного освещения // Таврический научный обозреватель. 2016. №5-1 (10). С. 364-367.
2. Семяняк М. В., Горюнов В. Н. Светодиодные источники света в системах наружного и внутреннего освещения // Вестник ОмГАУ. 2011. №2 (2). С. 59-62.
3. Идиатуллина А.М., Смоленцев Р.А. Управление энергоэффективностью и энергосбережением в сфере городского наружного освещения на материалах города Казани // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №18. С. 280-284.
4. Алексеев Е. Г., Шиков С. А., Ивлиев С. Н. Интеллектуальные системы на примере уличного освещения // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. №1-2. С. 439-442.
5. Валиуллин К. Р. Разработка алгоритма функционирования автоматизированной системы управления уличным освещением // Школа-семинар молодых ученых и специалистов в области компьютерной интеграции производства: материалы. Оренбург, 2016. С. 297-302. ISBN 978-5-7410-1608-4
6. Преимущества и недостатки ретрофита уличного освещения при установке светодиодных светильников, а также их влияние на потери активной мощности в трансформаторах распределительных сетей /А.И. Троицкий, С.С. Костинский, В.И. Власенко, Т.З. Химишев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2016. №2 (190). С. 53-61.
7. Крахмалев Е. И. Энергосервис в системах уличного освещения: технико-экономические аспекты // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. №35. С. 150-153.

8. Валиуллин, К.Р. Интеллектуальная система управления уличным освещением на основе нейросетевых технологий // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 4. С. 185–191.
9. Казаринов Л.С., Вставская Е.В., Барбасова Т.А. Концепция повышения энергетической эффективности комплексов наружного освещения // Фундаментальные исследования. 2011. № 12-3. С. 553-558.
10. Martyanov A. S., Korobatov D. V., Solomin E. V. Simulation model of public street lighting provided by a photovoltaic converter and battery storage // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on. IEEE, 2017. С. 1-5.
11. Sittoni A. et al. Street lighting in smart cities: A simulation tool for the design of systems based on narrowband PLC // Smart Cities Conference (ISC2), 2015 IEEE First International. – IEEE, 2015. С. 1-6.
12. Moreno I. et al. Modeling LED street lighting // Applied optics. 2014. Т. 53. №. 20. Р. 4420-4430.
13. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
14. Морозов А.П., Карандаев А.С., Ларина Т.П. Электротехника и энергетические системы обеспечения жизнедеятельности человека. Энергосбережение при освещении: монография. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2004. 186 с.
15. Винников Б.Г., Зеленский Д.А., Картавец В.В. Расчет режимов разомкнутых распределительных сетей методом распределения мощности // Вестник ВГТУ. 2009. №8. С. 171-174.
16. Айзенберг Ю.Б. Световые приборы. М.: Энергия, 1980. 463 с.
17. Кнорринг Г.М. Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения. Л.: Энергия, 1973. 200 с.
18. Никитин В.Д. Совершенствование методов расчета освещения улиц // Светотехника. 2001. №3. С.27-29.
19. Козловская В.Б., Радкевич В.Н., Колосова И.В. Влияние напряжения на основные характеристики ламп электрического освещения // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. №1. С.5-13.
20. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей / В.И. Константинов, Е.В. Вставская, Т.А. Барбасова, В.О. Волков // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2010. №2 (178). С.46-51.
21. Валиуллин К.Р. Анализ способов управления уличным освещением по различным критериям // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. Vмеждународ. техн. конф., Т.2., 10-14 ноября 2014 г., г. Томск, Мин-во образования и науки РФ, Томский политехнический университет. Томск, 2014. С. 275-279.
22. Валиуллин К.Р. Энергоэффективная система управления уличным освещением // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 12–16 декабря 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. с. 115-119.
23. Валиуллин К.Р. Нейросетевое прогнозирование временного ряда естественной освещенности для увеличения энергоэффективности систем управления уличным освещением // Материалы международной конференции «Эффективная энергетика–2015». Санкт-Петербург: СПбПУ, 2015. С. 237-242.

Поступила в редакцию 01 октября 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMITATIONAL MODELING OF A STREET LIGHTING SYSTEM

Kamil R. Valiullin

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

The article proposes an imitation model of an electrotechnical street lighting system, which includes the following components: a power supply model, a lighting network model, a lighting model of the lighting installation, a model of the street lighting control system and a model of changing environmental parameters. The Simulink program of MatLab mathematical package was chosen as simulation environment. The model of the lighting network based on the iterative method of calculation is realized, which allows calculating the steady-state conditions of the electrical part of the street lighting system. The model is implemented in the form of an m-function in the MatLab language and in the form of a functional block of the Simulink environment. Likewise, the lighting model of a street lighting installation was implemented taking into account the external illumination and the dependence of the light flux of various types of lamps on the value of the supply voltage. In addition, a model of various algorithms for controlling the street lighting system is implemented. The resulting simulation model allows analyzing the operation of electrotechnical street lighting systems over long periods through computer simulation thereby enabling the evaluation of the correctness of design solutions and the effectiveness of various energy efficiency measures.

Keywords: Imitation modeling, electrotechnical street lighting system, MatLab, Simulink, street lighting.

REFERENCES

1. Gavrilenko V.Yu. Development and application of rational street lighting. *Tavricheskiy nauchnyy obozrevatel* [Taurian scientific observer]. 2016, no. 5-1 (10), pp. 364-367. (In Russian)
2. Semenyak M.V., Goryunov V. N. LED light sources in systems of external and internal illumination. *Vestnik OMGU* [Bulletin of OmGAU]. 2011, no. 2 (2), pp. 59-62. (In Russian)
3. Idiatullina A.M., Smolentsev R.A. Management of energy efficiency and energy saving in urban outdoor lighting on the materials of the city of Kazan. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2014, no. 18, pp. 280-284. (In Russian)
4. Alekseev E. G., Shikov S. A., Ivliev S. N. Intellectual systems based on the example of street lighting. *Izvestiya samarskogo nauchnogo centra rossyskoy akademii nauk*. [News of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2017, no. 1-2, pp. 439-442. (In Russian)
5. Valiullin K.R., Semenova N.G. Development of an algorithm for the functioning of an automated control system for

- street lighting. School-Seminar of Young Scientists and Specialists in the Field of Computer Integration of Production: Materials. Orenburg, 2016, pp. 297-302 (In Russian)
6. Troitsky A. I., Kostinsky S. S., Vlasenko V. I., Khimishv T. Z. Advantages and disadvantages of retrofit of street lighting when installing LED light fixtures as well as their effect on the losses of active power in transformers of distribution networks. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*. [News from North-Caucasian region universities. Series: Technical sciences]. 2016, no. 2 (190), pp. 53-61. (In Russian)
 7. Krakhmalev E. I. Energy service in street lighting systems: technical and economic aspects. *Vestnik yuzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta seriya kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technology, management, electronics]. 2012, no. 35, pp. 150-153. (In Russian)
 8. Valiullin K.R., Semenova N. G. Intelligent street lighting control system based on neural network technologies. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University]. 2015, no. 4, pp. 185-191. (In Russian)
 9. Kazarinov L.S., Vstavskaya E.V., Barbasova T.A. The concept of increasing the energy efficiency of outdoor lighting complexes. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research]. 2011, no. 12-3, pp. 553-558. (In Russian)
 10. Martyanov A.S., Korobov D.V., Solomin E.V. Simulation of the public street lighting provided by a photovoltaic converter and battery storage. Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on. IEEE, 2017, pp. 1-5.
 11. Sittoni A. et al. Street lighting in smart cities: // Smart Cities Conference (ISC2), 2015 IEEE First International. IEEE, 2015, pp. 1-6.
 12. Moreno I. et al. Modeling LED street lighting. Applied optics. 2014. Vol. 53, no. 20, pp. 4420-4430.
 13. Idelchik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti: Uchebnik dlia vuzov* [Electrical Systems and Grids: Textbook for high schools]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1989. 592 p. (In Russian)
 14. Morozov A.P., Karandaev A.S., Larina T.P. *Elektrotehnika i energeticheskiye sistemy obespecheniya zhiznedeystel'nosti cheloveka. Energobezpecheniye pri osveshchenii: Monografiya* [Electrical engineering and energy systems to ensure human life. Energy Saving in Illumination: Monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2004. 186 p. (In Russian)
 15. Vinnikov B.G., Zelensky D.A., Kartavtsev V.V. Calculation of the modes of open distribution networks by the power distribution method. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University]. 2009, no. 8, pp. 171-174. (In Russian)
 16. Ayzenberg Yu.B. *Svetovye pribory* [Lighting devices]. Moscow: Energy, 1980. 463 p. (In Russian)
 17. Knorrin G.M. *Svetotekhnicheskie raschety v ustanovkakh iskustvennogo osveshcheniya* [Lighting calculations in artificial lighting]. Leningrad: Energy, 1973, 200 p. (In Russian)
 18. Nikitin V.D. Perfection of methods for calculating street lighting. *Svetotekhnika* [Lighting]. 2001, no. 3, pp. 27-29. (In Russian)
 19. Kozlovskaya V.B., Radkevich V.N., Kolosova I.V. Influence of voltage on the main characteristics of electric lighting lamps. *Energetika izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG* [Power Engineering. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS]. 2009, no. 1, pp. 5-13. (In Russian)
 20. Konstantinov V. I., Vstavskaya E. V., Barbasova T. A., Volkov V. O. Choice of the optimum mode of work of LED emitters. *Vestnik yuzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta seriya kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technology, management, electronics]. 2010, no. 2 (178), pp. 46-51. (In Russian)
 21. Valiullin K.R. Analysis of ways to control street lighting by various criteria. *Elektroenergetika glazami molodezhi: nauch. tr. V mezhdunar. tekhn. konf.* [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)
 22. Valiullin K.R., Semenova N.G. Energy-efficient street lighting control system. *Energo- i resursosberezhenie. Energobespechenie. Netraditsionnye i obnovlyayemye istochniki energii: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem* [Energy and Resource Saving. Energy supply. Non-traditional and renewable sources of energy: materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation] (Ekaterinburg, December 12-16, 2016). Ekaterinburg: UrFU, 2016, pp. 115-119. (In Russian)
 23. Valiullin K.R. Neural network forecasting of the time series of daylight to increase the energy efficiency of street lighting control systems. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii "Effektivnaya energetika - 2015"* [Proceedings of the international conference "Efficient Energy - 2015"]. St. Petersburg: SPbPU, 2015, pp. 237-242. (In Russian)

Валиуллин К.Р. Имитационное моделирование электротехнической системы уличного освещения // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 48-55. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-48-55](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-48-55)

Valiullin K.R. Imitational Modeling of a Street Lighting System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 48-55. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-48-55](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-48-55)