

УДК 621.321.11

Математические модели оптимальной структуры оперативного обслуживания электрических сетей

Васильев А.П., канд. техн. наук, Бандурин И.И., ассист.

Приведено описание математических моделей, позволяющих выбрать оптимальную структуру оперативного обслуживания предприятий электрических сетей, а также оптимальные места размещения баз обслуживания и устройств автоматики и телемеханики на подстанциях по критерию минимума затрат на систему оперативного обслуживания.

Ключевые слова: оперативное обслуживание, электрическая сеть, подстанция, автоматика, телемеханика.

Mathematical models of optimum structure of operative service of electric networks

Vasilev A.P., candidate of science, Bandurin I.I., research staff

Mathematical models are shown allow to choose optimum structure of operative service of the enterprises of electric networks, and also allow to choose optimum places of placing of bases of service and automatics and telemechanics devices on substations by criterion of a minimum costs for system of operative service.

Keywords: operative service, an electric network, substation, automated mechanisms, telemechanics.

Для обеспечения надежности, безопасности и экономичности энергоустановок на каждом энергообъекте должно быть организовано их оперативное обслуживание (ОО). Объемы ОО зависят от технического состояния оборудования и определяются задачей обеспечения надежности электрических сетей. Каждая энергоустановка предъявляет потоки требований, которые должны обслуживаться. Поток требований в единицу времени – это объем обслуживания.

Потоки требований делятся на плановые и аварийные, объемы которых существенно зависят от типов и количества оборудования на объектах (подстанциях, распределительной сети и т.д.). Поток плановых требований поступает на оперативное обслуживание; поток аварийных требований поступает на оперативное и аварийное обслуживание.

Процесс поступления в систему обслуживания потока требований является вероятностным и представляет собой поток однородных или неоднородных событий, которые наступают через случайные промежутки времени.

Учитывая нестационарность потока требований, задачу можно решать для определенного интервала времени функционирования системы обслуживания, в пределах которого можно принять параметр потока постоянным. Для каждого такого отрезка времени может проводиться анализ работы системы обслуживания.

Анализ входящего потока требований в систему эксплуатации позволяет планировать и выполнять его обслуживание с максимальной эффективностью.

Виды ОО подстанций 35 кВ и выше могут быть следующими:

- 1) ОО местным оперативным персоналом;
- 2) ОО оперативно-выездными бригадами (ОВБ) (за ОВБ закрепляется автомашина,

оборудованная радиосвязью, для возможности обслуживания подстанций в закреплённой за ней зоне. Зона обслуживания ОВБ может устанавливаться в широких пределах).

ОО местным оперативным персоналом может быть организовано следующим образом:

- 1) дежурство на подстанции двух электромонтеров в смене;
- 2) дежурство на подстанции одного электромонтера в смене;
- 3) дежурство на дому одного электромонтера в смене.

Дежурство электромонтеров (ДЭ) на подстанции организуется круглосуточно. При ОО выполняются: оперативные переключения, подготовка рабочих мест и приемка их после окончания работ, устранение мелких неисправностей, осмотры оборудования и т.д.

Вид ОО, количество оперативных работников в смену или на электроустановке определяются лицом, ответственным за электрохозяйство, при согласовании с руководством предприятия (организации) и указываются в местных инструкциях [3].

Для оперативной работы на ремонтно-эксплуатационных базах организовываются диспетчерские и оперативные пункты, оборудованные средствами диспетчерского и технологического управления.

В систему эксплуатации современных предприятий электрических сетей входят устройства автоматики и телемеханики (рис. 1). Устройства телемеханики подразделяются по типу и выполняемым функциям. Условно в энергосистемах оснащённость устройств телемеханики определяется четырьмя уровнями:

- 1) телеуправление и телесигнализация;
- 2) телесигнализация;
- 3) вызывная телесигнализация;

4) отсутствие устройств телемеханики.

Это могут быть: управляющие вычислительные комплексы, устройства телемеханики, устройства телесигнализации. Объем информации этих устройств, система сбора и передачи информации многообразны. Перечень (объем) устройств телемеханики и связи, затраты на их приобретение определяются при выборе системы организации эксплуатации электрических сетей.

Автоматизация подстанций и электрических сетей во всем мире получила в последнее время бурное развитие благодаря применению новой техники на основе микропроцессоров. В итоге создаются объектно-ориентированные интегрированные системы управления подстанцией, реализующие:

- АРН и автоматическое регулирование реактивной мощности;
- управление дугогасящими катушками;
- АПВ и программные коммутационные переключения;
- управление оборудованием (отображение схемы, оперативные переключения, блокировки, синхронизация);
- связь с диспетчерским пультом;
- измерения электроэнергии;
- контроль и регистрацию (определение мест повреждения, контроль режима, регистрация параметров, анализ режима);
- автоматический анализ оперативной и эксплуатационной информации;
- технические функции (приемные испытания, оценка данных).

Благодаря этому может быть существенно повышена надежность и эффективность функционирования энергосистем, производительность труда оперативного персонала.

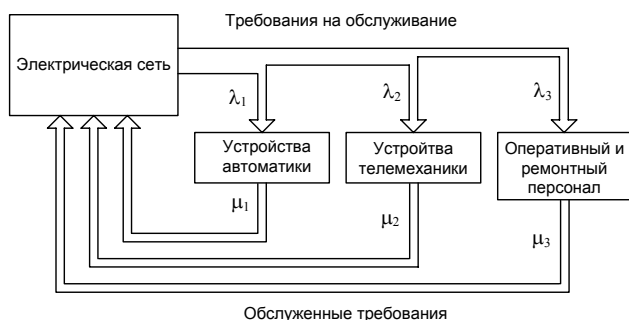


Рис. 1. Функциональная схема обслуживания требований электрической сети

Анализ технологических нарушений показывает, что в числе причин, снижающих надежность энергосистем и электрических сетей, имеют место причины, связанные с функционированием системы оперативного обслуживания [2]. Действие факторов, снижающих надежность электрических сетей, может быть скомпенсировано или ослаблено за счет выбора соответствующей «конструкции» системы эксплуатации. Например: при отсутствии устройств телемеханики или отказе их функции выполняются персоналом.

Важной особенностью электрических сетей является то, что персонал, обслуживающий электрооборудование, в основном располагается на ремонтно-производственных базах, находящихся вдали от обслуживаемых объектов. Поэтому для выполнения работы необходимо выезжать на место его нахождения. Удаленность объектов характеризуется расстоянием, которое может достигать нескольких сотен километров.

Эффективная работа электрических сетей существенным образом зависит от производственных затрат, эффективности использования установленного оборудования, выполнения мероприятий по обеспечению надежности и безопасности.

Можно выделить три основные задачи, которые нужно решить для выбора оптимальной структуры ОО.

Задача №1. Имеется n различных подстанций (ПС) и m различных баз. Каждая ПС является источником аварийных λ_1 или λ_2 плановых требований. Оперативное обслуживание ПС может быть осуществлено ДЭ на подстанции, ДЭ на дому или ОВБ. Каждый обслуживающий канал характеризуется своей интенсивностью аварийного $\mu_{1ДЭ}$, $\mu_{1ДЭ \text{ на дому}}$, $\mu_{1ОВБ}$ и планового $\mu_{2ДЭ}$, $\mu_{2ДЭ \text{ на дому}}$, $\mu_{2ОВБ}$ обслуживания. Требуется так распределить КП между ДП, ДЭ и ДЭ на дому, чтобы минимизировать затраты на систему оперативного обслуживания.

Задача №2. Существует некоторое множество $Z \in \{z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_k\}$ допустимых вариантов размещения баз, где k – количество вариантов размещения. Пусть i -й вариант размещения субъекта обслуживания имеет стоимость сооружения c_i . Требуется выбрать место размещения баз так, чтобы минимизировать их стоимость размещения и расходы на обслуживание ПС. При этом срок окупаемости проекта равен T .

Задача №3. Существует некоторое множество $D \in \{d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_k\}$ допустимых вариантов размещения средств телемеханики и автоматики (ТМиА), где k – количество вариантов размещения. Пусть i -й вариант размещения субъекта обслуживания имеет стоимость сооружения K_i . Требуется выбрать оптимальный вариант размещения средств ТМиА так, чтобы минимизировать стоимость размещения средств ТМиА и расходы на обслуживание объектов. При этом срок окупаемости проекта равен T .

Исходная информация для реализации моделей представлена в табл. 1. Целевые функции и их ограничения представлены в табл. 2, 3. Задача оптимального распределения ресурсов решена методом дискретного линейного программирования.

Краткое описание решения. Примем, что интенсивность требований λ не зависит от вида обслуживания ПС, а зависит только от самой ПС. Хотя, согласно [4], это не так, при обслуживании ПС ДЭ или ДЭ на дому требуется ежедневно производить осмотры всего оборудования в дневное время, а при обслуживании ОВБ достаточно производить их только один или два раза в месяц. При необходимости эта зависимость может быть учтена дополнительно.

В общем случае время нахождения требования в системе массового обслуживания (СМО) определяется как

$$t_{СМО} = t_{об} + t_{оч},$$

где $t_{об}$ – время обслуживания требования; $t_{оч}$ – среднее время ожидания в очереди.

Задача определения $t_{оч}$ решена с использованием методов теории массового обслуживания. Для этого исходную неоднородную нагрузку (рис. 2) сведем к эквивалентной (с точки зрения загрузки системы) однородной (рис. 3).

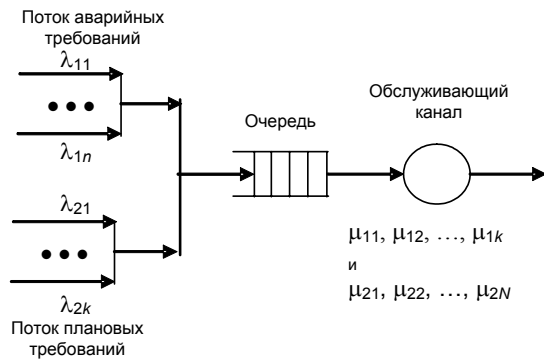


Рис. 2. Графическое представление СМО с неоднородной нагрузкой

Это сведение включает следующие преобразования исходных параметров (предполагается, что все входные потоки являются простейшими):

1) $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ — интенсивность требований объединенного потока;

2) $\mu = \lambda / \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{\mu_i} \right)$ — интенсивность обслуживания требований объединенного потока.

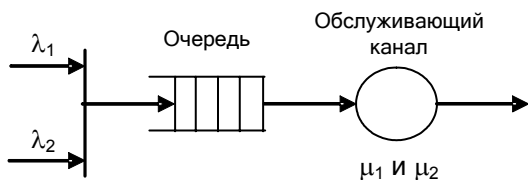


Рис. 3. Графическое представление СМО с однородной нагрузкой

Обслуживающий канал обслуживает каждый поток в соответствии с принципом FIFO,

т.е. «первый пришел, первым ушел». Поток аварийных требований имеет приоритет над потоком плановых требований. Граф состояний процесса ОО требований ПС показан на рис. 4. Поток аварийных требований последовательно переводит систему из любого левого состояния в соседнее правое с одной и той же интенсивностью λ_1 . Интенсивность же потока обслуживания, переводящих систему из любого правого состояния в соседнее левое, — μ_1 . Поток плановых требований последовательно переводит систему из любого крайнего левого состояния в соседнее правое с интенсивностью λ_2 . Интенсивность потока обслуживания, переводящих систему из любого крайнего правого состояния в соседнее левое, — μ_2 .

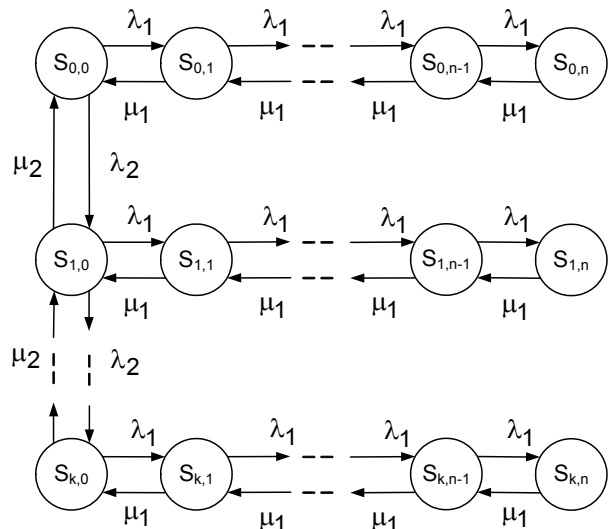


Рис. 4. Граф состояний процесса ОО требований ПС

Пронумеруем состояния СМО по числу требований, находящихся в системе:

S_{00} – обслуживающий канал свободен (следовательно, очереди нет);

S_{01} – обслуживающий канал занят, и очереди нет, т.е. в СМО находится (под обслуживанием) одна аварийная заявка;

S_{10} – обслуживающий канал занят и очереди нет, т.е. в СМО находится (под обслуживанием) одна плановая заявка;

S_{11} – обслуживающий канал занят обслуживанием одной аварийной заявки, и в очереди стоит одна плановая заявка;

.....
 S_{kn} – обслуживающий канал занят обслуживанием одной аварийной заявки, и в очереди еще стоит $(n-1)$ аварийных и k плановых требований.

В результате исследования графа состояний модели были получены формулы для определения средней длины плановых $L_{очпл}$ и аварийных $L_{очав}$ требований:

$$L_{очав} = \frac{\rho_1^2}{1 - \rho_1}; \quad L_{очпл} = \frac{\rho_2^2}{1 - \rho_2} + \rho_2 \rho_1,$$

где $\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}$ и $\rho_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}$ – интенсивности загрузки

обслуживающего канала аварийными и плановыми требованиями.

Если $\lambda > \mu$ ($\rho > 1$), т.е. среднее число требований, поступивших в систему за единицу времени, больше среднего числа обслуживаемых требований за то же время при непрерывно работающем канале, то очевидно, что очередь неограниченно растет.

В случае $\lambda = \mu$ ($\rho = 1$) только при условии, что входящий поток требований и поток обслуживаний регулярные (т.е. заявки поступают в СМО через равные интервалы времени, и время обслуживания одной заявки является постоянным, равным интервалу времени между поступлениями требований), очереди вообще не будет и канал будет обслуживать заявки непрерывно. Но как только входящий поток или поток обслуживаний перестает быть регулярным и приобретает элементы случайности, очередь начинает расти до бесконечности.

Среднее время ожидания в очереди найдем по формуле Литтла:

$$t_{очпл} = \frac{L_{очпл}}{\lambda_2}; \quad t_{очав} = \frac{L_{очав}}{\lambda_1}.$$

Представляет интерес найти такие ρ_1 и ρ_2 , чтобы интенсивность обслуживания с учетом времени ожидания была равна интенсивности требований. Тогда все поступившие за период времени t требования будут обслужены.

По определению имеем

$$\mu_{СМО} = \frac{1}{t_{СМО}} = \frac{1}{t_{об} + t_{оч}} = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + t_{оч}} = \lambda. \quad (1)$$

Решая уравнения (1) для плановых и аварийных требований, получаем, что такое возможно при $\rho_1 \leq 0,5$ и $\rho_2 \leq 0,44$.

Задачи №1 и №2 относятся к дискретным линейным задачам. Такие задачи имеют следующую математическую формулировку:

- целевая функция: $f^T x \rightarrow \min$;

- ограничения:

$$\begin{cases} \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \\ \mathbf{A}eq \cdot \mathbf{x} = beq, \\ \mathbf{x} \text{ бинарный}, \end{cases}$$

где \mathbf{f} , \mathbf{b} и beq – вектора; \mathbf{A} и $\mathbf{A}eq$ – матрицы; \mathbf{x} – решение, которое должно быть бинарным вектором, т.е. его элементами могут быть числа, которые принимают значения 0 либо 1.

Решение \mathbf{x} получаем с использованием стандартных математических пакетов, таких как MS Excel или Matlab [1].

Целевая функция задачи №3 по максимуму чистого дисконтированного дохода имеет без учета ущерба следующий вид:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{t=1}^T a_t (Z_{зод} - Z_{зодi,t} - K_{i,t}) \cdot d_i \rightarrow \max.$$

Целевая функция с учетом ущерба имеет вид

$$\sum_{i=1}^k \sum_{t=1}^T a_t (Z_{зод} - Z_{зодi,t} + Y_{зод} - Y_{зодi,t} - K_{i,t}) \cdot d_i \rightarrow \max,$$

где a_t – коэффициент дисконта; $Z_{зод}$, $Y_{зод}$ – текущие затраты на систему ОО и ущерб, оплачиваемый потребителю; $Z_{зодi,t}$, $Y_{зодi,t}$ – затраты на систему ОО и ущерб, оплачиваемый потребителем при i -м варианте и в t году.

Годовые затраты следует определять по формуле

$$\begin{aligned} Z_{зод} = & 12 \cdot (Z_{1ДЭ} \cdot n_{ДЭ} + \\ & + Z_{1ДЭ_на_дому} \cdot n_{ДЭ_на_дому} + \\ & + Z_{1ОВБ} \cdot n_{ОВБ} + Z_{ТМИА}) + Z_{машина} \cdot t_{машин_год}, \end{aligned}$$

где $n_{ДЭ}$, $n_{ДЭ_на_дому}$, $n_{ОВБ}$ – количество ДЭ, ДЭ на дому и ОВБ; $t_{машин_год}$ – суммарное время работы всех машин в год; $Z_{ТМИА}$ – затраты на обслуживание устройств автоматики и телемеханики.

Таким образом, задача сводится к поиску такого размещения средств ТМИА d_i , так чтобы чистый дисконтированный доход был максимален.

Максимум целевой функции ищется при следующих ограничениях: $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_k]$ – решение, которое должно быть бинарным вектором.

Капиталовложения не должны превышать максимально возможные:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{t=1}^T K_{i,t} \leq K_{\max}.$$

Таблица 1. Условные обозначения, принимаемые в оптимизационной модели ОО

Условные обозначения	Описание условных обозначений
$i = 1, 2 \dots n$	i – номер ПС, n – количество всех обслуживаемых ПС
$j = 1, 2 \dots m$	j – номер ОВБ, m – количество всех ОВБ на всех базах
$k = 1, 2 \dots p$	k – номер базы, p – количество всех баз
$Z_{ДЭ}$	Затраты на содержание одного ДЭ в месяц
$Z_{ДЭ_на_дому}$	Затраты на содержание одного ДЭ на дому в месяц
$Z_{ОВБ}$	Затраты на содержание одной ОВБ в месяц
$Z_{час}$	Затраты на 1 ч работы ОВБ
$K_{ДЭ} = \ K_{ДЭ\ i}\ $	Матрица-столбец затрат на создание канала обслуживания – ДЭ
$K_{ДЭ_на_дому} = \ K_{ДЭ_на_дому\ j}\ $	Матрица-столбец затрат на создание канала обслуживания – ДЭ на дому
$K_{ОВБ} = \ K_{ОВБ\ j}\ $	Матрица-столбец затрат на создание канала обслуживания – ОВБ
$k_{см} = 3$	Коэффициент сменности
$\lambda_1 = \ \lambda_{1i}\ $	Матрица аварийных требований в обслуживании i -й ПС
$\lambda_2 = \ \lambda_{2i}\ $	Матрица плановых требований в обслуживании i -й ПС
$t_{обсл_ав} = \ t_{обсл_ав\ i}\ $	Матрица аварийных времен обслуживания для i -й ПС
$t_{обсл_пл} = \ t_{обсл_пл\ i}\ $	Матрица плановых времен обслуживания для i -й ПС
$t_{дост} = \ t_{дост\ i, j}\ $	Матрица времен доставки j -й ОВБ на i -ю ПС
$t_{пр} = \ t_{пр\ i}\ $	Матрица времен прибытия ДЭ на дому на i -ю ПС
$c = \ c_k\ $	Матрица капитальных затрат на создание k -й базы
$b = \ b_k\ $	Матрица максимального количества ОВБ на k -й базе
$x_{ДЭ} = \ x_{ДЭ\ i}\ $	Матрица размещения ДЭ на ПС с элементами: $\begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я ПС обслуживается ДЭ,} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$
$x_{ДЭ_на_дому} = \ x_{ДЭ_на_дому\ j}\ $	Матрица размещения ДЭ на дому на ПС с элементами: $\begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я ПС обслуживается ДЭ на дому,} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$
$x_{ОВБ} = \ x_{ОВБ\ i, j}\ $	Матрица размещения ОВБ на ПС с элементами: $\begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я ПС обслуживается } j\text{-й ОВБ,} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$
y_j	Индикаторная переменная, показывающая необходимость в j -й ОВБ: $\begin{cases} 1, & \text{если } x_{ОВБ\ i, j} > 0, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$
z_k	Индикаторная переменная, показывающая необходимость в k -й базе: $\begin{cases} 1, & \text{если } y_j > 0, j \in k, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$

Таблица 2. Целевые функции и их ограничения для задач №1 и №2

Целевые функции	Описание
$K_{см} \cdot (Z_{1ДЭ} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ДЭ_i} + Z_{1ДЭ_на_дому} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ДЭ_на_дому_i} + Z_{ЮВБ} \cdot \sum_{j=1}^m Y_j) +$ $+ Z_{час} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\lambda_{1i} + \lambda_{2i}) \cdot t_{месяц} \cdot 2 \cdot t_{дости,j} \cdot X_{ОВБ_{i,j}} +$ $+ \frac{1}{T} \left(\sum_{i=1}^n K_{ДЭ_i} \cdot X_{ДЭ_i} + \sum_{i=1}^n K_{ДЭ_на_дому_i} \cdot X_{ДЭ_на_дому_i} + \sum_{j=1}^m K_{ОВБ_j} \cdot Y_j \right) +$ $+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_{1i} \cdot t_{месяц} \cdot P_i \cdot C_{уд,i} \cdot ((t_{обсл_ав_i} + t_{оч_ав_ДЭ_i}) \cdot X_{ДЭ_i} +$ $+ (t_{обсл_ав_i} + t_{при} + t_{оч_ав_ДЭ_на_дому_i}) \cdot X_{ДЭ_на_дому_i} +$ $+ (t_{обсл_ав_i} + t_{дости,j} + t_{оч_ав_ОВБ_{i,j}}) \cdot X_{ОВБ_{i,j}}) \rightarrow \min$	Минимум ежемесячных затрат на систему ОО (задача №1)
$K_{см} \cdot (Z_{1ДЭ} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ДЭ_i} + Z_{1ДЭ_на_дому} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ДЭ_на_дому_i} + Z_{ЮВБ} \cdot \sum_{j=1}^m Y_j) +$ $+ \frac{1}{T} \left(\sum_{i=1}^n K_{ДЭ_i} \cdot X_{ДЭ_i} + \sum_{i=1}^n K_{ДЭ_на_дому_i} \cdot X_{ДЭ_на_дому_i} + \sum_{j=1}^m K_{ОВБ_j} \cdot Y_j \right) +$ $+ Z_{час} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\lambda_{1i} + \lambda_{2i}) \cdot t_{месяц} \cdot 2 \cdot t_{дости,j} \cdot X_{ОВБ_{i,j}} \rightarrow \min$	Минимум ежемесячных затрат на систему ОО без учета ущерба (задача №1)
$K_{см} \cdot (Z_{1ДЭ} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ДЭ_i} + Z_{1ДЭ_на_дому} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ДЭ_на_дому_i} + Z_{ЮВБ} \cdot \sum_{j=1}^m Y_j) +$ $+ Z_{час} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\lambda_{1i} + \lambda_{2i}) \cdot t_{месяц} \cdot 2 \cdot t_{дости,j} \cdot X_{ОВБ_{i,j}} +$ $+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_{1i} \cdot t_{месяц} \cdot P_i \cdot C_{уд,i} \cdot ((t_{обсл_ав_i} + t_{оч_ав_ДЭ_i}) \cdot X_{ДЭ_i} +$ $+ (t_{обсл_ав_i} + t_{при} + t_{оч_ав_ДЭ_на_дому_i}) \cdot X_{ДЭ_на_дому_i} +$ $+ (t_{обсл_ав_i} + t_{дости,j} + t_{оч_ав_ОВБ_{i,j}}) \cdot X_{ОВБ_{i,j}}) \rightarrow \min$	Минимум ежемесячных затрат на систему ОО без учета затрат на создание каналов обслуживания (задача №1)
$K_{см} \cdot (Z_{1ДЭ} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ДЭ_i} + Z_{1ДЭ_на_дому} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ДЭ_на_дому_i} + Z_{ЮВБ} \cdot \sum_{j=1}^m Y_j) +$ $+ Z_{час} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\lambda_{1i} + \lambda_{2i}) \cdot t_{месяц} \cdot 2 \cdot t_{дости,j} \cdot X_{ОВБ_{i,j}} \rightarrow \min$	Минимум ежемесячных затрат на систему ОО без учета ущерба и затрат на создание каналов обслуживания (задача №1)
$K_{см} \cdot (Z_{1ДЭ} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ДЭ_i} + Z_{1ДЭ_на_дому} \cdot \sum_{i=1}^n X_{ДЭ_на_дому_i} + Z_{ЮВБ} \cdot \sum_{j=1}^m Y_j) +$ $+ Z_{час} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\lambda_{1i} + \lambda_{2i}) \cdot t_{месяц} \cdot 2 \cdot t_{дости,j} \cdot X_{ОВБ_{i,j}} + \frac{\sum_{k=1}^p C_k Z_k}{T} \rightarrow \min$	Минимум ежемесячных затрат на систему ОО без учета ущерба и затрат на создание каналов обслуживания (задача №2)

Таблица 3. Ограничения для целевых функций задач №1 и №2

Ограничения целевых функций	Описание
$x_{ОВБi,j}, x_{ДЭ_на_домуi}, x_{ДЭi}, y_j, z_k$ - бинарные переменные	Переменные могут принимать значения либо 0, либо 1
$\sum_{j=1}^m x_{ОВБi,j} + x_{ДЭ_на_домуi} + x_{ДЭi} = 1$	Для каждой ПС должен быть выбран только один из обслуживающих каналов
$\sum_{i=1}^n x_{ОВБi,j} \geq y_j \quad y_j \geq x_{i,j}$	Ограничение для индикаторной переменной
$\sum_{i=1}^n \rho_{i,j,1} \cdot x_{ОВБi,j} \leq 0,5$	Загрузка ОВБ, ДЭ и ДЭ на дому аварийными требованиями не должна быть более 50 %, плановыми – не более 44 %
$\sum_{i=1}^n \rho_{i,j,2} \cdot x_{ОВБi,j} \leq 0,44$	
$\rho_{i,ДЭ,1} \cdot x_{ДЭi} + \rho_{i,ДЭ_на_дому,1} \cdot x_{ДЭ_на_домуi} \leq 0,5$	
$\rho_{i,ДЭ,2} \cdot x_{ДЭi} + \rho_{i,ДЭ_на_дому,2} \cdot x_{ДЭ_на_домуi} \leq 0,44$	
$\sum_{j=b_{k-1}+1}^{b_k} y_j \geq z_k \quad z_k \geq y_j, \quad j \in k$	Ограничение для индикаторной переменной
$\sum_{i=1}^k c_i z_i \leq K_{\max}$	Капиталовложения не должны превышать максимально возможные

Заключение

Разработанные математические модели позволяют определить оптимальную структуру системы ОО, выбрать оптимальное место размещения баз обслуживания, а также определить оптимальное место установки средств ТМиА по критерию минимума затрат на систему ОО. Приведенные математические модели могут быть адаптированы для решения задач ремонтного обслуживания.

Васильев Анатолий Петрович,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
кандидат технических наук, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов,
телефон (812) 555-49-93,
e-mail: vasil@mrsksevzap.ru

Бандурин Иван Иванович,
Псковский государственный политехнический институт,
ассистент кафедры теоретических основ электротехники,
адрес: 180025, Россия, г. Псков, ул. Байкова, д. 17, кв. 9
телефон 8-905-295-07-74,
e-mail: bandurin_ivan@mail.ru

Список литературы

1. **Дьяконов В., Круглов В.** Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001.
2. **Анализ** эксплуатационной надежности оборудования электрических сетей / М.Ш. Мисриханов, А.Н. Назарычев, А.И. Таджикибаев и др. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Сб. науч. тр. Вып. 58. – М.; Н.Новгород, 2008. – С. 75–84.
3. **Правила** технической эксплуатации электроустановок потребителей. НЦ ЭНАС. – М., 2005 (621.3, П-683).
4. **Правила** устройства электроустановок (ПУЭ), изд. 7-е, НЦ ЭНАС. – М., 2004 (621.31, П-683).