

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ОПЕРАТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Бандурин И. И.¹

(Псковский государственный политехнический институт,
Псков)

Предлагается адаптивное управление структурой оперативного обслуживания с точки зрения минимума затрат на содержание системы оперативного обслуживания. Предложена методика выбора оптимальной суммы затрат на устройства автоматики и телемеханики на подстанции. Разработана математическая модель, которая позволяют выбрать оптимальные количество, вид и места размещения оперативного персонала.

Ключевые слова: оперативное обслуживание, подстанция, телемеханика, устройства автоматики, электрическая сеть.

1. Введение

Для обеспечения надежности, безопасности и экономичности энергоустановок в каждой энергосистеме должно быть организовано оперативное управление [15]. Под оперативным обслуживанием (ОО) электроустановки понимается комплекс работ по ведению требуемого режима работы электроустановки; производству переключений, осмотров оборудования; подготовке к производству ремонта (подготовке рабочего места, допуску); техническому обслуживанию оборудования, предусмотренному должностными и производственными инструкциями оперативного персонала [12].

¹ Иван Иванович Бандурин, ассистент (bandurin_ivan@mail.ru).
252

Объемы ОО зависят от технического состояния оборудования и определяются задачей обеспечения надежности электрических сетей. Согласно [14], на всех стадиях проектирования развития энергосистем с соответствующей степенью конкретизации рекомендуется учитывать следующие вопросы:

- ✓ организации ремонтно-эксплуатационного обслуживания (сервисные службы и др.);
- ✓ оснащения средствами диспетчерского и технологического управления;
- ✓ обеспечения устойчивости параллельной работы энергосистем;
- ✓ использования средств релейной защиты и противоаварийной автоматики;
- ✓ оснащения автоматическими системами управления;
- ✓ оснащения АСКУЭ.

При разработке вопросов организации ремонта, технического и оперативного обслуживания электросетевых компаний учитываются следующие исходные данные [11]:

- ✓ форма и структура ремонтно-эксплуатационного обслуживания и оперативно-диспетчерского управления подстанциями (ПС);
- ✓ технические средства для ремонтно-эксплуатационного обслуживания и оперативно-диспетчерского управления ПС.

Проведенный критический анализ существующих систем ОО электрических сетей 6-110 кВ показал, что, как правило, при проектировании развития энергосистем не разрабатывается вопрос оптимальной организации системы ОО.

Сегодня в России наблюдается возрастающий интерес к интенсивно развивающемуся в последнее десятилетие во всем мире направлению научно-технологического инновационного преобразования электроэнергетики на базе новой концепции *Smart Grid*. Государственные структуры в большинстве стран рассматривают *Smart Grid* как идеологию национальных программ развития электроэнергетики, компании-производители

оборудования и технологий – как перспективную основу оптимизации бизнеса, энергетические компании – как базу для обеспечения устойчивой инновационной модернизации своей деятельности [6].

Развитие методов оптимизации и способов управления системой ОО электрической сети является важной задачей, которую нужно решить для обеспечения клиенто-ориентированного подхода в концепции *Smart Grid*. Поэтому актуальной является задача оптимальной организации системы ОО электрических сетей и управления ее структурой.

2. Обзор литературы

Из литературы известен ряд методик [1-3, 8, 9] решения данной задачи.

В [1] предложена методика выбора оптимальной системы ОО электрических сетей 6-330 кВ, в том числе, и при возможных ограничениях. Методика позволяет анализировать состояние существующих систем ОО электрических сетей, оценивать возможности системы ОО в различных экстремальных ситуациях и разрабатывать мероприятия по её совершенствованию. К недостаткам предложенной методики можно отнести сложность в составлении математической модели. Это связано с тем, что все возможные варианты субъектов обслуживания $d[M]$ и соответствующие им планы обслуживания $X[M, N]$ должны быть учтены в математической модели. Так, например, минимальное число вариантов субъектов обслуживания для одной ПС будет равно 5, а для 10 ПС минимальное число вариантов субъектов обслуживания уже будет равно $5^{10} \approx 10^7$.

В работе [2] представлена более совершенная методика. Методика позволяет оптимизировать структуру системы эксплуатации сетевого предприятия на основе статистической информации о надежности его работы. Недостатком методики является то, что не учитываются такие формы ОО электрических сетей, как дежурство электромонтера на дому и обслужи-

вание требований средствами телемеханики и автоматики (ТМиА).

В работе [8] предложена методика выбора оптимального количества бригад ОВБ. Для обоснования увеличения числа ОВБ следует сопоставить сокращение недоотпуска электроэнергии, достигаемого при увеличении числа оперативно-выездных бригад (ОВБ), с дополнительными затратами на содержание ОВБ. Описанная выше методика применима только для сетей 6-10 кВ, где обслуживание электроустановок осуществляется, как правило, только ОВБ. Для сетей 35-110 кВ требуются специальные методики, учитывающие их особенности.

Работы [3, 9] посвящены оптимизации состава работающих агрегатов электростанций и выбору оптимальной системы оперативно-диспетчерского управления электростанции. Поэтому они имеют ограниченную область применения.

В связи с указанными недостатками существующих методик актуальной остается разработка более совершенной методики организации оптимальной системы ОО электрических сетей 35-110 кВ и управления ее структурой.

3. Поток требований по оперативному обслуживанию электрических сетей

В систему ОО электрических сетей поступают требования (заявки) со стороны электрической сети. В соответствии с характером производимых работ, а также по способу и срокам подачи заявки в систему ОО электрических сетей, заявки подразделяются на следующие виды: плановые, срочные, неплановые, неотложные и аварийные.

Плановые – заявки на работы, выполняемые в соответствии с утвержденными месячными планами, составленными на основании годового плана ремонта оборудования или графиками технического обслуживания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и противоаварийной автоматики (ПА).

В случае появления дефекта или отказа перевод оборудования из одного оперативного состояния в другое оформляется четырьмя видами заявок:

срочные – заявки для проведения непланового, неотложного и аварийного ремонта, необходимость в котором возникла в процессе эксплуатации, либо в процессе аварийного отключения воздушных линий (ВЛ), оборудования, устройств РЗА и ПА;

неплановые – заявки на работы, отсутствующие в утвержденном годовом и месячном плане ремонтов, необходимость в которых возникла в процессе эксплуатации;

неотложные – заявки на неотложные работы для повышения (восстановления, стабилизации) эксплуатационных характеристик оборудования, требующие срочного отключения для предотвращения непрогнозируемого снижения эксплуатационных характеристик, способных привести к повреждению и последующему аварийному отключению ВЛ, оборудования, устройств РЗА и ПА;

аварийные – заявки на работы, выполняемые на ВЛ и оборудовании, отключившихся действием защит и автоматики или отключенных оперативным персоналом энергообъекта в соответствии с требованиями производственных инструкций.

Так как данные четыре вида заявок имеют случайный характер появления, то математической основой описания процесса ОО может являться теория вероятностей и теория массового обслуживания (ТМО). В качестве основных показателей системы ОО электрических сетей, в соответствии с [13], выберем следующие:

- интенсивность потока требований λ (1/ч.),
- интенсивность обслуживания требований μ (1/ч.).

Под интенсивностью потока требований λ понимается количество требований в единицу времени. Интенсивность потока требований λ не является постоянной, она имеет ярко выраженную сезонную составляющую. Учитывая нестационарность потока требований, задачу анализа входящего потока можно решать для определенного интервала времени функционирова-

ния системы ОО, в пределах которого можно принять параметр потока постоянным. Для каждого такого отрезка времени может проводиться анализ работы системы ОО.

Пусть функция потока $\lambda = f(t)$ непрерывна на отрезке $[a; b]$ и $f(t) \geq 0$. Фигура, ограниченная графиком АВ функции $\lambda = f(t)$, прямыми $t = a$, $t = b$ и осью Ot (рис. 1), называется криволинейной трапецией. С геометрической точки зрения определенный интеграл от неотрицательной функции численно равен площади соответствующей криволинейной трапеции.

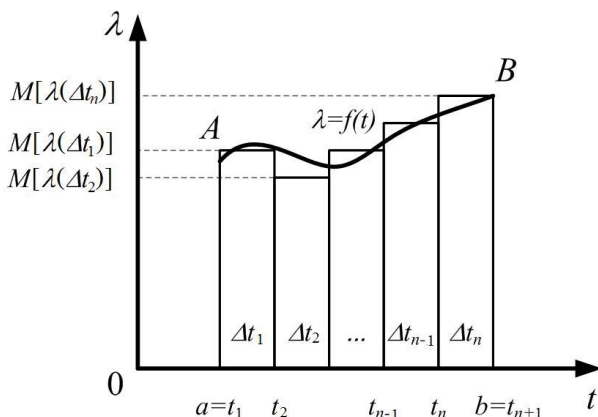


Рис. 1. Разбиение функции потока требований на интервалы

Разобьем отрезок $[a; b]$ произвольным образом на n неравных отрезков. Число отрезков разбиения n выбираем исходя из вида графика функции потока $\lambda = f(t)$ потока таким образом, чтобы в пределах каждого отрезка можно было приближено считать параметр потока постоянным. При этом примем значение потока на каждом отрезке постоянным и равным математическому ожиданию $M[x]$ функции потока $\lambda(t)$ на интервале Δt_k . Произведение $M[\lambda(\Delta t_k)] \cdot \Delta t_k$ равно площади прямоугольника с основанием $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ и высотой $M[\lambda(\Delta t_k)]$, а сумма $\sum M[\lambda(\Delta t_k)] \cdot \Delta t_k$ представляет собой площадь ступенчатой фигуры (изображенной на рис. 4).

Для оценки качества разбиения отрезка $[a; b]$ введем параметр точность разбиения ε как разность между площадью криволинейной трапеции и площадью ступенчатой фигуры:

$$\varepsilon = \int_a^b \lambda dt - \sum_{k=1}^n M[\lambda(\Delta t_k)] \cdot \Delta t_k.$$

Очевидно, что точность разбиения ε зависит от количества интервалов разбиения n отрезка $[a; b]$. Чем больше n , тем меньше Δt_k и тем ближе площадь ступенчатой фигуры к площади криволинейной трапеции, а, следовательно, и выше точность разбиения.

Таким образом, задача определения границ интервалов Δt_k для заданного количества интервалов n сводится к минимизации параметра точности разбиения ε :

$$\int_a^b \lambda dt - \sum_{k=1}^n M[\lambda(\Delta t_k)] \cdot \Delta t_k \rightarrow \min.$$

Интенсивность обслуживания μ одного требования одним обслуживающим устройством определяется из соотношения:

$$(1) \quad \mu = \frac{1}{t_{об}},$$

где $t_{об}$ – среднее время обслуживания одного требования одним обслуживающим прибором.

Среднее время обслуживания $t_{об}$ – одна из важнейших характеристик обслуживающих приборов, которая определяет пропускную способность всей системы. Время обслуживания одного требования $t_{об}$ – случайная величина, которая может изменяться в большом диапазоне. Случайная величина полностью характеризуется законом распределения. На практике чаще всего принимают гипотезу о показательном законе распределения времени обслуживания. Показательный закон распределения времени обслуживания имеет место тогда, когда плотность распределения резко убывает с возрастанием времени t . Например, когда основная масса требований обслуживается быстро, а продолжительное обслуживание встречается редко.

Наличие показательного закона распределения времени обслуживания устанавливается на основе статистических наблюдений. При показательном законе распределения времени обслуживания вероятность события, что время обслуживания продлится не более чем t , равна

$$P_{об}(t) = 1 - e^{-\mu t}.$$

Анализ входящего потока требований в системе ОО электрических сетей дает возможность планировать и выполнять его обслуживание с максимальной эффективностью.

4. Постановка задачи

В систему эксплуатации современных предприятий электрических сетей входят устройства ТМиА. Каждая энергоустановка предъявляет потоки требований, которые должны обслуживаться. Объемы потоков требований существенно зависят от типов и количества оборудования на объектах (подстанциях, распределительной сети и т. д.). Поток требований на обслуживание распределяется между обслуживающими приборами. Обслуживающими приборами являются оперативный и ремонтный персонал, а также устройства ТМиА (рис. 2).

Объем функций автоматики, телемеханики, оперативного и ремонтного персонала устанавливаются местными инструкциями [10].

Виды ОО ПС 35 кВ и выше могут быть следующими:

- ✓ ОО местным оперативным персоналом;
- ✓ ОО оперативно-выездными бригадами (ОВБ).

За ОВБ закрепляется автомашина, оборудованная радиосвязью для возможности обслуживания подстанций (ПС) в закрепленной за ней зоне. Зона обслуживания ОВБ может устанавливаться в широких пределах.

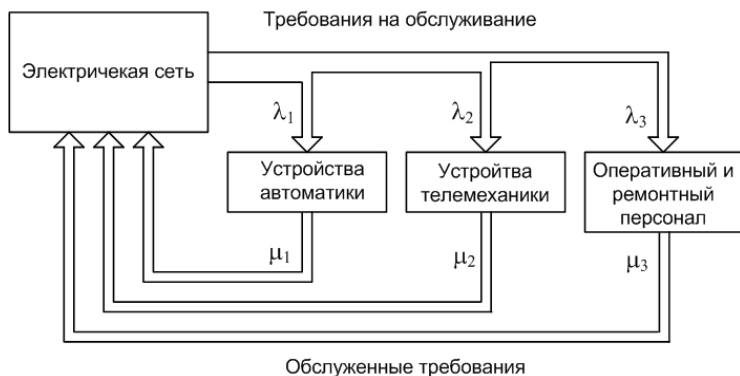


Рис. 2. Функциональная схема обслуживания требований

ОО местным оперативным персоналам может быть организовано следующим образом:

- ✓ дежурство на подстанции двух электромонтеров в смене;
- ✓ дежурство на подстанции одного электромонтера (ДЭ) в смене;
- ✓ дежурство на дому одного электромонтера (ДЭ на дому) в смене.

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

Устройства телемеханики подразделяются по типу и выполняемым функциям. Условно в энергосистемах оснащенность устройствами телемеханики определяется четырьмя уровнями:

1. телеуправление и телесигнализация;
2. телесигнализация;
3. вызывная телесигнализация;
4. отсутствие устройств телемеханики.

Виды устройств телемеханики, систем сбора и передачи информации многообразны.

Автоматизация ПС во всем мире получила в последнее время большое развитие благодаря применению новой техники

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

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

Анализ технологических нарушений показывает, что в числе причин, снижающих надежность энергосистем и электрических сетей, имеют место причины, связанные с функционированием системы ОО [7]. Действие факторов, снижающих надежность электрических сетей, может быть скомпенсировано или ослаблено за счет выбора соответствующей «конструкции» системы ОО. Например, при отсутствии устройств телемеханики или отказе их функции выполняются персоналом.

Предложен модифицированный принцип построения системы ОО электрических сетей и механизм его адаптации к изменяющимся условиям, которые представлены структурной схемой рис. 3.

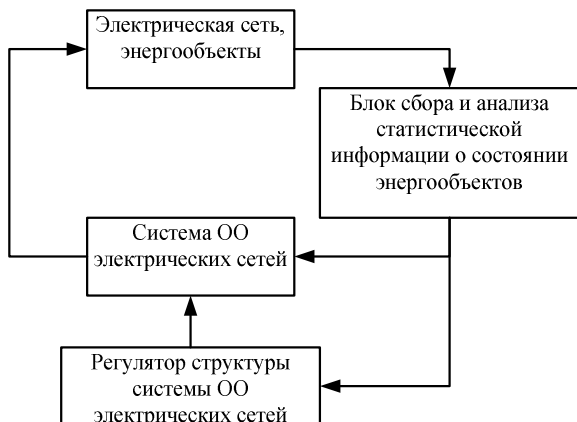


Рис. 3. Структурная схема адаптивного управления эффективностью системы ОО электрических сетей

Регулятор структуры системы ОО получает информацию о работе системы ОО от блока сбора и анализа информации. Регулятор оценивает эффективность работы и затраты на систему ОО и осуществляет изменения структуры системы ОО при необходимости.

Алгоритм управления структурой ОО представлен на рис. 4.

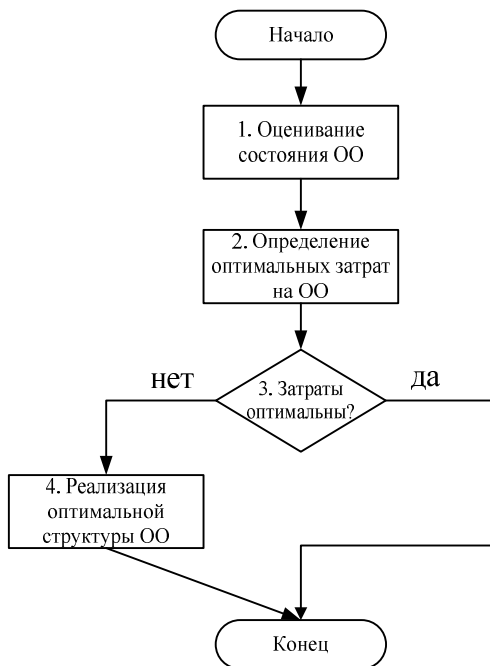


Рис. 4. Блок схема алгоритма управления структурой ОО

Для работы регулятора требуется разработка методов анализа и синтеза оптимальной структуры системы ОО с точки зрения минимума затрат на систему ОО.

5. Оптимальная загрузка обслуживающего прибора

Требования на обслуживание в основном носят случайный характер. Поэтому полная загрузка обслуживающего прибора недопустима, иначе средняя длина очереди будет бесконечно расти. Найдем оптимальную загрузку обслуживающего прибора.

В общем случае время нахождения требования в системе массового обслуживания:

$$t_{смo} = t_{об} + t_{оч},$$

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

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

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

$$1) \lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i - \text{интенсивность объединенного потока требований, 1/час;}$$

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

Обслуживающий прибор обслуживает требования в соответствии с принципом *FIFO*, т. е. «первый пришел, первым ушел».

Средняя длина очереди $L_{оч}$ требований для системы массового обслуживания с бесконечным временем ожидания [13]:

$$(2) L_{оч} = \frac{\rho^2}{1 - \rho},$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ – коэффициент загрузки обслуживающего прибора требованиями.

Среднее время ожидания в очереди $t_{оч}$, находим по формуле Литтла:

$$(3) \quad t_{оч} = \frac{L_{оч}}{\lambda}.$$

Найдем такую ρ , чтобы интенсивность обслуживания с учетом времени ожидания была равна интенсивности требований. Тогда все поступившие за период времени t требования будут обслужены.

По определению имеем:

$$(4) \quad \mu_{СМО} = \frac{1}{t_{СМО}} = \frac{1}{t_{об} + t_{оч}} = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + t_{оч}} = \lambda.$$

Решим уравнение (4), для этого подставим в (4) вместо $t_{оч}$ (3), а вместо $L_{оч}$ (2). В результате получим, что такое возможно при коэффициенте загрузки обслуживающего прибора $\rho \leq 0,5$.

6. Методика выбора оптимальных затрат на устройства телемеханики и автоматики на подстанции

Коэффициент загрузки оперативного персонала требованиями ρ – важнейший параметр ПС. При понижении коэффициента загрузки оперативного персонала ρ уменьшаются затраты на ОО ПС, но, одновременно, растут капитальные затраты на устройства ТМиА.

Сокращение затрат на ОО ПС может быть достигнуто за счет применения различных средств, которые можно разделить на две группы. К первой группе (рис. 5,а) относятся мероприятия уменьшающие интенсивность потока требований λ : усиление изоляции, использование более надежного оборудования и т. п. Вторая группа мероприятий (рис. 5,б) – применение уст-

роЙств обнаружения места повреждения, использование устройств телемеханики и т. п. – влияет на изменение среднего времени обслуживания одного требования. И, следовательно, согласно (1) вторая группа мероприятий влияет и на интенсивность обслуживания μ одного требования.

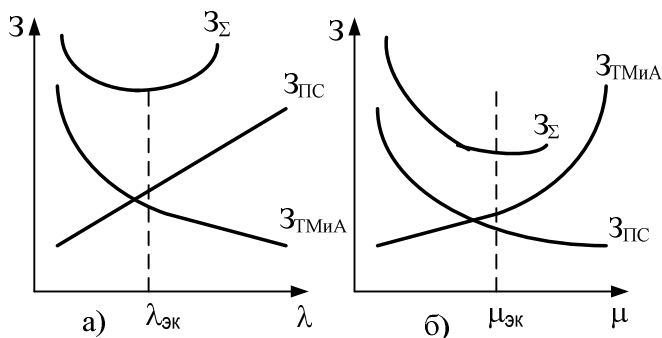


Рис. 5. Зависимость приведенных затрат от:
 а – интенсивности требований;
 б – интенсивности обслуживания требований

Определение оптимального коэффициента загрузки ρ оперативного персонала находим с помощью целевой функции минимума приведенных затрат Z_{Σ} :

$$(5) \quad Z_{\Sigma} = Z_{ПС} + Z_{ТМИА} \rightarrow \min ,$$

где $Z_{ПС}$ – приведенные затраты на обслуживание ПС, $Z_{ТМИА}$ – приведенные капитальные затраты на устройства ТМИА.

Затраты на ПС зависят от вида ОО. При обслуживании ПС ОВБ, затраты состоят из затрат на обслуживание требований ($Z_{об}$), затрат на доставку ОВБ ($Z_{досл}$) и затрат на ущерб оплачиваемый потребителю ($У$), а при обслуживании ее ДЭ, состоят только из затрат на обслуживание требований и ущерба оплачиваемого потребителю:

$$\begin{cases} Z_{ПС_ОВБ} = Z_{об} + Z_{досл} + У, \\ Z_{ПС_ДЭ} = Z_{об} + У. \end{cases}$$

Затраты на обслуживание требований также зависят от вида ОО. При обслуживании ПС ОВБ затраты на обслуживание требований прямо пропорциональны коэффициенту загрузки требованиями ОВБ со стороны ПС. Чем меньше коэффициент загрузки требованиями ОВБ со стороны ПС, тем большее количество ПС может быть обслужено ОВБ. Таким образом, затраты на обслуживание распределяются между всеми ПС пропорционально их коэффициенту загрузки требованиями ОВБ. При обслуживании ПС ДЭ либо ДЭ на дому, затраты на обслуживание требований постоянны и практически не зависят от коэффициента загрузки требованиями ОВБ.

$$\begin{cases} Z_{об_ОВБ} = 12 \cdot k_{см} \cdot Z_{1ОВБ} \cdot \frac{\rho_{ПС}}{\rho_{\Sigma ПС}}, \\ Z_{об_ДЭ} = 12 \cdot k_{см} \cdot Z_{1ДЭ}, \\ Z_{об_ДЭ_на_дому} = 12 \cdot k_{см} \cdot Z_{1ДЭ_на_дому}, \end{cases}$$

где $k_{см}$ – коэффициент сменности; $Z_{1ДЭ}$, $Z_{1ДЭ_на_дому}$, $Z_{1ОВБ}$ – ежемесячные затраты на содержание ДЭ, ДЭ на дому и ОВБ, руб.; $\rho_{ПС}$ – коэффициент загрузки ОВБ требованиями с данной ПС; $\rho_{\Sigma ПС}$ – суммарная коэффициент загрузки ОВБ требованиями со всех обслуживаемых ею ПС.

Затраты на доставку ОВБ зависят от частоты выездов ОВБ на ПС и затрат на 1 час работы машины ОВБ:

$$Z_{дост} = 2 \cdot Z_{1час} \cdot \lambda \cdot t_{год} \cdot t_{дост},$$

где $Z_{1час}$ – затраты на содержание одной машины ОВБ, руб/ час; λ – интенсивность потока требований, 1/час; $t_{год}$ – количество часов в году, час; $t_{дост}$ – время доставки ОВБ с базы на ПС, час.

Затраты на ущерб оплачиваемый потребителю:

$$Y = k_{ав} \cdot c_0 \cdot P \cdot t_{год} \frac{\lambda}{\mu},$$

где $k_{ав}$ – коэффициент аварийных требований; c_0 – удельная величина ущерба, руб./кВт·ч; μ – интенсивность обслуживания

требования, 1/час; P – средняя мощность одного присоединения ПС, кВт.

Затраты на ТМиА:

$$Z_{ТМиА}(\lambda, \mu) = (E + \alpha_{ам}) \cdot K(\lambda, \mu),$$

где $\alpha_{ам}$ – ежегодные затраты на амортизацию и текущий ремонт устройств ТМиА; E – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений; K – капитальные затраты на устройства ТМиА, руб.

Минимуму целевой функции (5) будет соответствовать некоторая экономическая $\lambda_{ЭК}$ или $\mu_{ЭК}$ в зависимости от того, мероприятие какой группы проводилось. Далее по известной $\lambda_{ЭК}$ ($\mu_{ЭК}$) определяем оптимальные затраты на устройства ТМиА. Выбор коэффициента загрузки оперативного персонала аналогичен выбору сечения проводов и кабелей по экономической плотности и экономическим интервалам [5]. Поэтому в общем случае целесообразно строить несколько кривых $Z_{ТМиА}$ для оборудования различных фирм и находить оптимальное решение методом экономических интервалов.

7. Методика выбора оптимального количества, вида и места размещения оперативного персонала

Для определения вида ОО необходимо знать оптимальное количество ДЭ, ДЭ на дому и ОВБ. Математическая модель строится на основе функции годовых затрат на ОО и ограничения на загрузку требования обслуживающего прибора (таблица 1).

Годовые затраты на систему ОО определяются по формуле:

$$Z_{год} = 12 \cdot (Z_{1ДЭ} \cdot n_{ДЭ} + Z_{1ДЭ_на_дому} \cdot n_{ДЭ_на_дому} + Z_{1ОВБ} \cdot n_{ОВБ}) + Z_{ТМиА} + Z_{1машина} \cdot t_{машин_год} + Y,$$

где $n_{ДЭ}$, $n_{ДЭ_на_дому}$, $n_{ОВБ}$ – количество ДЭ, ДЭ на дому и ОВБ, $t_{машин_год}$ – суммарное время работы всех машин ОВБ в год, час.

Целевая функция по минимуму затрат на систему ОО без учета ущерба выглядит как

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{зод}} = & 12 \cdot k_{\text{см}} \cdot (Z_{1\text{ДЭ}} \cdot \sum_{i=1}^n x_{\text{ДЭ}i} + \\
 (6) \quad & + Z_{1\text{ДЭ_на_дому}} \cdot \sum_{i=1}^n x_{\text{ДЭ_на_дому}i} + Z_{1\text{ОВБ}} \cdot \sum_{j=1}^m y_j) + \\
 & + Z_{1\text{час}} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_i \cdot t_{\text{зод}} \cdot 2 \cdot t_{\text{досл},j} \cdot x_{\text{ОВБ}i,j} \rightarrow \min.
 \end{aligned}$$

Таблица 1. Ограничения целевой функции

Ограничение	Описание
$x_{\text{ОВБ}i,j}, x_{\text{ДЭ_на_дому}i}, x_{\text{ДЭ}i}, y_j$ – бинарные переменные	Переменные могут принимать значения либо 0, либо 1
$\sum_{j=1}^m x_{\text{ОВБ}i,j} + x_{\text{ДЭ_на_дому}i} + x_{\text{ДЭ}i} = 1$	Для каждой ПС должен быть выбран только один из обслуживающих приборов
$\sum_{i=1}^n x_{\text{ОВБ}i,j} \geq y_j; \quad y_j \geq x_{i,j}$	Ограничение для индикаторной переменной
$\sum_{i=1}^n \rho_{i,j} \cdot x_{\text{ОВБ}i,j} \leq 0,5;$ $\rho_{\text{ДЭ}i} \cdot x_{\text{ДЭ}i} \leq 0,5;$ $\rho_{\text{ДЭ_на_дому}i} \cdot x_{\text{ДЭ_на_дому}i} \leq 0,5$	Загрузка ОВБ, ДЭ и ДЭ на дому требованиями не должна быть более 0,5

где $x_{\text{ДЭ}i}$, $x_{\text{ДЭ_на_дому}i}$, $x_{\text{ОВБ}i,j}$ – переменные плана обслуживания, а y_j – индикаторная переменная.

$$x_{\text{ДЭ}i} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ая ПС обслуживается ДЭ,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$x_{ДЭ_на_дому_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ая ПС обслуживается ДЭ,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$x_{ОВБ_{i,j}} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ая ПС обслуживается } j\text{-ой ОВБ,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{если } x_{ОВБ_{i,j}} \geq 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Методика нахождения решения целевой функции (6) заключается в следующем:

1. Записываем целевую функцию (6) и ограничения (таблица 1) для конкретной задачи.

2. Приводим целевую функцию и ограничения к следующему виду:

$$\text{Целевая функция: } \mathbf{f}^T \mathbf{x} \rightarrow \min, \text{ ограничения } \begin{cases} \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \\ \mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq}, \\ \mathbf{x} \text{ бинарный,} \end{cases}$$

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

3. Решение \mathbf{x} получаем с помощью методов линейного дискретного программирования. Решение \mathbf{x} также может быть получено с помощью стандартных математических пакетов, например функции *bintprog* программы *Matlab* [4].

8. Методика выбора оптимальной структуры оперативного обслуживания

Пусть существует некоторое множество $D \in \{d_1, \dots, d_k\}$ допустимых вариантов структуры ОО, где k – количество вариантов. Пусть i -й вариант структуры имеет стоимость сооружения K_i . Требуется выбрать оптимальный вариант структуры ОО так, чтобы минимизировать стоимость сооружения и расходы на

обслуживание объектов. При этом срок окупаемости проекта равен T .

Целевая функция по минимуму дисконтированных затрат на систему ОО имеет следующий вид:

$$(7) \quad \sum_{i=1}^k \sum_{t=1}^T a_t (K_{i,t} + Z_{zod_{i,t}} + Y_{zod_{i,t}}) \cdot d_i \rightarrow \min ,$$

где a_t – коэффициент дисконта; $K_{i,t}$ – капитальные затраты на систему ОО при i -м варианте в году t , руб; $Z_{zod_{i,t}}$ – затраты на систему ОО при i -м варианте в году t , руб; $Y_{zod_{i,t}}$ – ущерб, оплачиваемый потребителю при i -м варианте системы ОО в году t , руб.

Таким образом, задача выбора оптимальной структуры ОО сводится к поиску такого варианта структуры ОО d_i , для которого дисконтированные затраты были бы минимальными.

Алгоритм выбора оптимального варианта структуры ОО заключается в следующем:

1. Определяем оптимальные затраты на систему ОО для ПС для i -го варианта и года t с помощью (5);
2. Определяем оптимальные затраты на систему ОО для i -го варианта и года t с помощью (6);
3. Определяем полные дисконтированные затраты для i -го варианта;
4. Выбираем оптимальный вариант структуры ОО, который имеет минимальные дисконтированные затраты (7).

9. Заключение

Предложен модифицированный принцип построения системы ОО электрических сетей и механизм его адаптации к изменяющимся условиям. Разработанные математические модели позволяют определить оптимальный вариант структуры ОО по критерию минимума затрат на систему ОО.

Так как требования в основном носят случайный характер, то коэффициент загрузки обслуживающего прибора требованиями не должен превышать 0,5.

Литература

1. БОЙЦОВ Ю.А., ВАСИЛЬЕВ А.П. *Решение задачи рациональной организации системы оперативного обслуживания электрических сетей* // Проблемы энергетики. Казанский государственный энергетический университет. – 2008. – № 1-2. – С. 40 – 45.
2. ВАСИЛЬЕВ А.П., ПАПКОВ Б.В., КАРАБАНОВ А.А. *Оптимизация структуры и оценка эффективности системы эксплуатации оборудования электрической сети* // Задачи надежности систем энергетики для субъектов отношений в энергетических рынках: Сб. статей – К.: Знання України, 2007. – Вып. 57. – С. 204 – 211.
3. ГАЙИБОВ Т.Ш. *Оптимизация состава работающих агрегатов электростанций кусочно-линейной аппроксимацией нелинейных зависимостей* // Электрические станции – 2009. – №5. – С. 32 – 37.
4. ДЬЯКОНОВ В., КРУГЛОВ В. *Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник.* – СПб.: Питер. – 2001 – С. 376 – 379.
5. ИДЕЛЬЧИК В.И. *Электрические сети и системы.* – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – С. 263 – 274.
6. КОБЕЦ Б.Б., ВОЛКОВА И.О. *Smart Grid – Концептуальные положения* // Энергорынок. – 2010. – №3 (75) – С. 67 – 72.
7. МИСРИХАНОВ М.Ш., НАЗАРЫЧЕВ А.Н., ТАДЖИБАЕВ А.И. и др. *Анализ эксплуатационной надежности оборудования электрических сетей* // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Сборник научных трудов – М.: –Н. Новгород. – 2010. – Вып. 58 – С. 75 – 84.
8. ЗОРИН В.В., ТИСЛЕНКО В.В., КЛЕППЕЛЬ Ф., АДЛЕР Г. *Надежность систем электроснабжения*, К.: Вища шк., Головное изд-во. – 1984. – С. 173 – 175.

9. ПИЛИПЕНКО Г.В. *Выбор оптимальной системы оперативно-диспетчерского управления электростанции* // Энергетик. – 2008. – №10. – С. 34 – 35.
10. *Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей*. «НЦ ЭНАС», М.: 2005 (621.3, П-683). – С. 14 – 15.
11. Приложение к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» от 13.04.2009 № 136, *нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС)*. – С. 5 – 6.
12. РД 153-34.0-03.150-00, *Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок*. – М. – 2001. – С. 6.
13. СААКЯН Г.Р. *Теория массового обслуживания: Текст лекций* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://window.edu.ru/window_catalog/pdf2txt?p_id=23374 (дата обращения: 01.03.2010).
14. СО 153-34.20.118-2003 *«Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем»*, – М: ФГУП НТЦ "Промышленная безопасность". – 2006. – С. 4.
15. Федеральный закон "Об электроэнергетике": собрание законодательства РФ, 31 марта 2003, №13, ст. 1177. – М.: Изд. «Юридическая литература». – 2003. – С. 2951 – 2995.

STRUCTURE MANAGEMENT FOR OPERATIVE SERVICE OF ELECTRIC NETWORKS

Ivan Bandurin, Pskov State Polytechnic Institute, Pskov, assistant (bandurin_ivan@mail.ru).

Abstract: An adaptive approach is suggested to structure management of operative service with the aim of minimization of maintenance costs of the service. The technique is offered of choosing the optimal amount of expenses for automation and remote control

devices on power substation. The mathematical model is developed of choosing optimal headcount, skills and disposition of operating staff.

Keywords: operational service, power substation, remote control, automation devices, power grid.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии О. П. Кузнецовым*