

УДК 622.23.08

И. С. ЕВДАСЕВ, кандидат технических наук, В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, А. В. ДРОБОВ, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Рассмотрен разработанный метод автоматического поиска рационального варианта электрических связей между трансформаторными подстанциями и распределительными устройствами с наименьшими приведенными затратами. Изменение схем питания узлов с целью их оптимизации позволяет снизить потери энергии без дополнительных затрат на модернизацию сети.

При учете электромагнитных процессов система нетягового электроснабжения железной дороги переменного тока представляет собой многомерный нелинейный динамический объект. Ввиду большой размерности, сложности и недостаточной информационной обеспеченности практическое использование динамических моделей систем нетягового электроснабжения на современном этапе не представляется возможным. Поэтому для определения режимов данных систем актуально использование имитационного моделирования.

Целью данной работы является разработка программы определения варианта организации электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта на основании метода статистических испытаний. Выбор наилучшего варианта осуществляется по критериям наименьших приведенных затрат и вероятности безотказной работы.

Ниже приведено описание трех разработанных программ, позволяющих выбрать наилучший вариант электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта.

1 Имитационная модель электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта.

Алгоритм ИМ электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта (ИМ УЗЛОВ) основан на поиске варианта организации электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта с наименьшими приведенными затратами с помощью метода статистических испытаний на основании матрицы возможных электрических связей между трансформаторными подстанциями. ИМ УЗЛОВ реали-

зовано в виде web-приложения, которое не требует установки на компьютер заказчика объемного программного обеспечения, обновление происходит автоматически, обеспечивается высокая мобильность везде, где есть доступ в интернет. Предусмотрен расчет для существующей сети, не предполагающий капитальные затраты на сооружение сети.

Алгоритм предписывает выполнить следующие действия:

Шаг 1. Внесение исходных данных:

– координаты точек расположения источника питания (ИП), распределительные устройства трансформаторных подстанций (РУ) и трансформаторных подстанций (ТП) ($x_i, y_i, i = \overline{1, n}$);

– сведения о всех ТП: номер или название ТП; P_p – расчетная активная нагрузка потребителя; $\cos \varphi_p$ – расчетный коэффициент мощности; категории потребителей; T_M – число часов использования максимума нагрузки в год; $U_{ном}$ – напряжение первичной обмотки трансформаторов; k_ϕ – коэффициент формы графика нагрузки участка сети.

Автоматически выполняются: визуализация расположения ИП, РУ и ТП на координатной сетке; масштабирование координатной сетки до размера окна программы и указание соответствующих текстовых подписей; масштабирование изображения ИП, РУ и ТП.

На рисунке 1 представлен расчет в ИМ УЗЛОВ однолинейной упрощенной схемы электросети для фидера № 502 ЭЧС-17 от ПС “Мясокомбинат” Витебской дистанции электроснабжения.

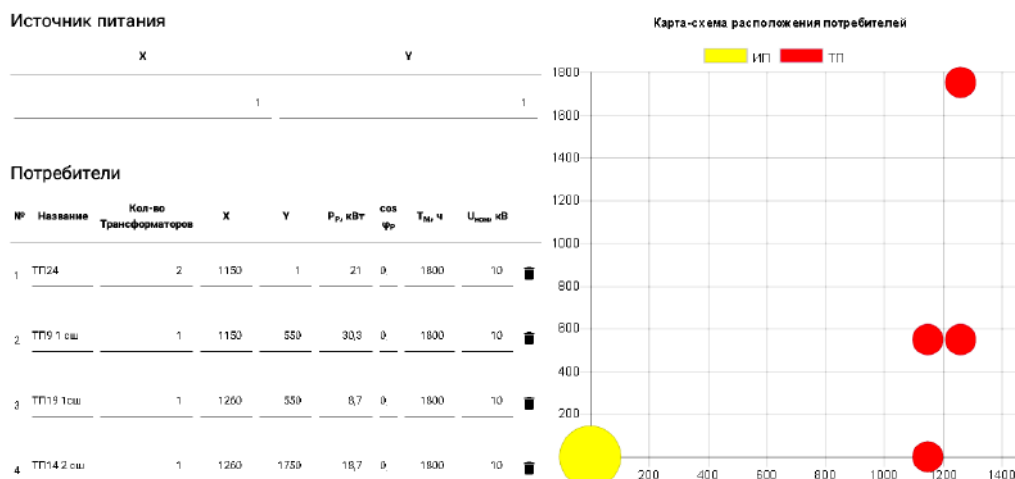


Рисунок 1 – Пример внесения исходных данных и визуализации в программе ИМ УЗЛОВ

Шаг 2. Отображение и заполнение матрицы связи между ТП и РУ. Данная процедура позволяет сформировать матрицу всех возможных соединений между ТП и РУ с учетом ограничений (рисунок 2, а) для розыгрыша различных вариантов методом статистических испытаний. Главная диагональ не используется, а выбор ТП или РУ разыгрывается с помощью генератора случайных чисел. Данную матрицу легко редактировать, активируя или убирав соответствующие символы связей между ТП или РУ.

Выполняется расчет кратчайших расстояний между всеми объектами по формуле $l_{ij} = \sqrt{x_i - x_j^2 + y_i - y_j^2}$; редактор позволяет также изменять расстояния в соответствии с существующими ограничениями. При необходимости определения кратчайшего расстояния между объектами с учетом ограничений на местности используется встроенная дополнительная программа LOGR.



Рисунок 2 – Пример заполнения матрицы связи между ТП (а) и выбора номинальной мощности, коэффициентов загрузки и расчета потерь в трансформаторах ТП, а также выбор сечения проводов кабелей (б)

Шаг 3. Выполняется расчет реактивной и полной мощности. Осуществляется выбор номинальной мощности трансформаторов на основании условий:

– в случае однотрансформаторных подстанций $S_{нт} \geq S_p$, $S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}$;

– для двухтрансформаторных подстанций $2S_{нт} \geq S_p$, $1,4S_{нт} = S_p - S_{откл}$, где $S_{откл}$ – мощность потребителей III категории, которые могут быть отключены при возникновении аварийного режима.

Таблицы стандартных полных мощностей трансформаторов соответствуют номенклатуре выпускаемых и имеющихся в технологическом запасе отделений дистанций электроснабжения. При необходимости можно изменить значение номинальной мощности трансформатора в таблице текущих результатов расчетов (рисунок 2, б) или пополнить/изменить содержание таблиц стандартных полных мощностей выбираемых трансформаторов.

Рассчитываются коэффициенты загрузки трансформаторов в нормальном и аварийном режимах.

Определяются нагрузки на высокой стороне за счет добавления потерь в трансформаторах ТП.

Шаг 4. Указывается число реализаций N (разыгрываемых вариантов организации электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта), определяемое заранее на основании заданной точности имитации откликов модели по известным формулам [1].

Уточняется число наиболее эффективных вариантов (N') организации электроснабжения с наименьшими приведенными затратами, которые будут приводиться с полной детализацией расчетов и схем.

Шаг 5. Запуск имитационного эксперимента. Данный этап предполагает построение сети электроснабжения с использованием процедур определения конечных, промежуточных и узловых ТП, визуализацию реализованного варианта сети с цветовой индикацией соединительных линий между объектами.

Выполняется расчет и выбор сечения проводов кабелей по критерию допустимого нагрева с учетом коэффициентов, учитывающих фактическую температуру земли и воздуха, отличие удельной проводимости земли от принятой в таблицах ПУЭ и количество работающих кабелей, лежащих рядом в земле. Также указывается экономическая плотность тока и экономическая площадь поперечного сечения жил кабеля.

Таблицы стандартных марок и сечений кабелей соответствуют номенклатуре выпускаемых промышленностью и имеющихся в технологическом запасе отделений дистанции электроснабжения. При необходимости можно изменить предложенную программой марку и сечение кабеля или пополнить/изменить содержание таблиц стандартных марок и сечений кабелей.

Шаг 6. Осуществляется технико-экономический расчет и сохранение результатов первого варианта организации электроснабжения по критерию приведенных затрат $Z_1 = p_H K_1 + I_1$ с учетом капитальных затрат на сооружение сети и издержек на эксплуатацию.

Шаг 7. Реализуются последующие варианты организации системы электроснабжения с последующим повторением пунктов 6 и 7, сравнение их результатов по критерию приведенных затрат. Если $Z_r < Z_{min}$, то $Z_r \equiv Z_{min}$, а если $Z_r > Z_{min}$, то значение Z_r ранжируется по возрастанию со всеми результатами, из которых со-

хранятся детализированные результаты только N' наиболее эффективных вариантов. Результаты представляются в виде N' наиболее эффективных вариантов в порядке возрастания приведенных затрат.

2 Имитационная модель электросетей продольного электроснабжения и линий автоматической блокировки железнодорожных участков.

Алгоритм ИМ электроснабжения электросетей продольного электроснабжения и линий автоматической блокировки (АБ) железнодорожных участков (ИМ ПЭ) основан на поиске варианта организации электроснаб-

жения с наименьшей величиной технологического расхода электрической энергии на ее транспортировку с помощью метода статистических испытаний на основании рационального подбора электрооборудования. Результаты моделирования ИМ ПЭ являются исходными данными ИМ УЗЛОВ для рационального выбора головных трансформаторов линий ПЭ и АБ.

Расчет с помощью ИМ ПЭ позволяет достичь следующих результатов:

- визуализации расстановки потребителей на линии ПЭ или АБ с помощью координатной оси (рисунок 3);

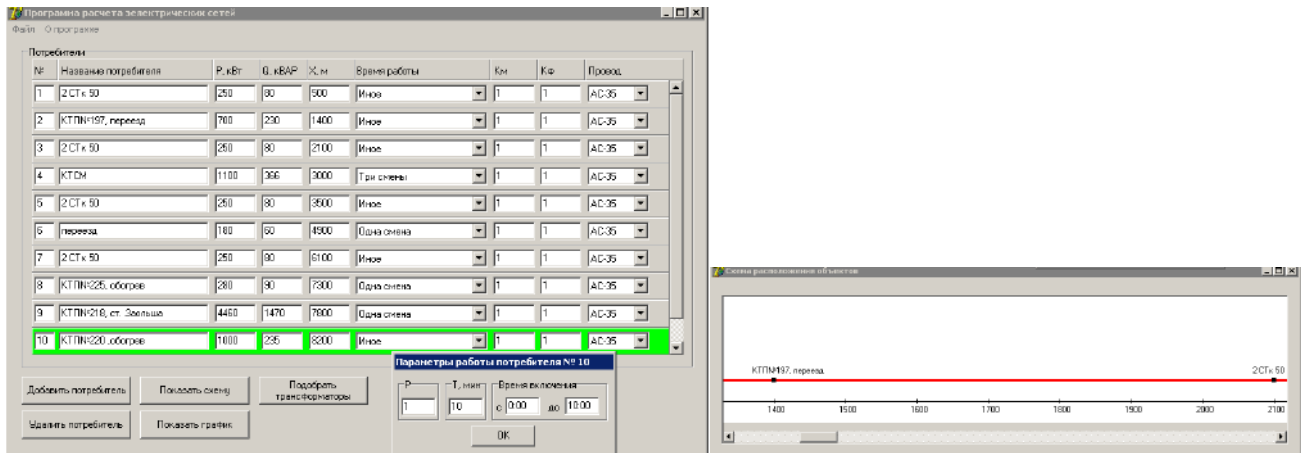


Рисунок 3 – Пример внесения исходных данных и визуализации расстановки потребителей для линии в программе ИМ ПЭ

- расчет полной мощности потребителя, на основании которой осуществляется выбор номинальной мощности трансформаторов и коэффициенты загрузки;
- расчет потерь ЭЭ в трансформаторах и линиях на основании ТКП 460-2012;
- потребление активной и реактивной ЭЭ за определенное время (по умолчанию принимается один год) для каждого потребителя с учетом количества рабочих смен в сутки потребителя;
- нагрузки на высокой стороне за счет добавления потерь в трансформаторах ТП;
- суммарные ТРЭТ в элементе (линии электропередачи, трансформаторе) электрической сети;
- расчет полной мощности линий продольного электроснабжения и автоматической блокировки;
- потери в головном трансформаторе, питающем линии ПЭ и АБ;
- распределение ТРЭТ между абонентами дистанции электроснабжения.

3 Имитационная модель оценки параметров надёжности электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта (ИМ НАДЕЖН).

Данная программа позволяет рассчитать вероятность безотказной работы ИМ ПЭ и N' наиболее эффективных вариантов ИМ УЗЛОВ. На основании полученной информации выявляются наиболее “узкие места” в различных вариантах схем электроснабжения, разрабатываются мероприятия по повышению надежности электроснабжения. Алгоритм ИМ НАДЕЖН предполагает следующие этапы:

- 1 На основании исходных данных составляется матрица надежности, предполагающая h объектов верхнего уровня ИМ НАДЕЖН и g нижнего. Для ИМ ПЭ в качестве исходных данных могут выступать питающий линию трансформатор ТП и потребители, для ИМ УЗЛОВ – фидер и ТП или РУ, для отдельных ТП – число трансформаторов ТП и подключенные к ним потребители (рисунок 4).

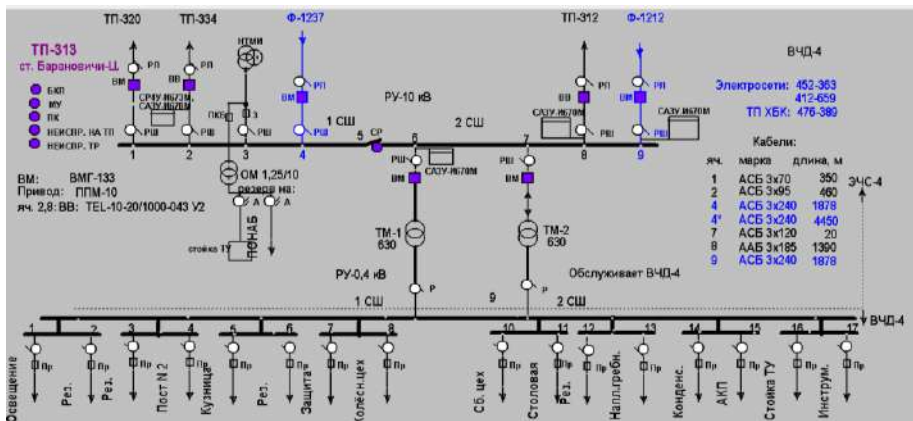


Рисунок 4 – АРМ Энергетика ТП-313 для фидера № 1212 ЭЧС-4 Барановичской дистанции электроснабжения

2 Заполняются соответствующие ячейки информацией о количестве элементов между объектами верхнего и нижнего уровней, а также о типах их соединения (последовательное, параллельное или сложное) и их наименовании.

3 Вносятся данные о интенсивности отказов всех элементов по имеющейся информации либо на основании разработанной библиотеки данных. Например, для трансформатора $\lambda = 0,035 \text{ год}^{-1}$, разъединителя шин – $0,08 \text{ год}^{-1}$, шин (10 м) – $0,001 \text{ год}^{-1}$ и т.д.

4 Указывается число реализаций имитационного эксперимента N , основанное на заданной точности имитации откликов модели.

5 Запускается имитационный эксперимент. На основании равномерного закона распределения генерируется для каждого элемента случайное число, в соответствии с которым разыгрывается отказ элемента.

6 Формируется выходной файл ИМ НАДЕЖН, содержащий информацию о вероятности безотказной работы для каждого приемника и для всей системы. Например, для ТП-313 от фидера № 1212 ЭЧС-4 Барановичской дистанции электроснабжения при $N = 1000$ модельных экспериментах вероятность безотказной работы составила 0,969306, а при аналитическом расчете – 0,969, что указывает на приемлемую точность результатов.

Статистическая проверка адекватности математической модели ИМ УЗЛОВ.

Проверка адекватности результатов программы и аналитического расчета активной и реактивной мощностей проводилась на шаге расчета, соответствующего выбору полной мощности трансформаторов, для фидера № 206 ЭЧС-16 Витебской дистанции электроснабжения. Статистические оценки параметров распределения случайной величины: несмещенная оценка дисперсии $S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^r N_j (\Delta u_j - \bar{\Delta u})^2$.

Для проверки *непротиворечивости* применялся критерий согласия Пирсона χ^2 . Вычисленное χ^2 сравнивалось с табличным $\chi_{\alpha=0,05, v=4-2-1}^2 = 3,841$.

Для оценки систематической ошибки проверялась гипотеза о равенстве нулю математического ожидания расхождений с помощью критерия Фишера, для чего вычислялась статистика $|t|$, которая сравнивалась с $t_{\text{крит}}(1-\alpha, N-1)$ при уровне значимости 0,05 $|t| = 0,8 < t_{\text{крит}} = 1,74$.

Для оценки *точности* модели рассчитывался радиус доверительного интервала, который не превосходит допустимой погрешности $\left(\frac{\bar{\Delta u}}{s} \sqrt{N} = 0,8 \leq \delta \right)$.

Таким образом, можно сформулировать следующие выводы:

Получено 01.09.2017

I. S. Evdasev, V. N. Galushko, A. V. Drovov, Modeling of the electrical supply system of nontyagovy consumers-ray of railway transport.

For electric networks of railway nodes of power supply distances, a method of automatic search for a rational version of electrical connections between transformer substations and distribution devices with the least reduced costs has been developed. Changing the power schemes of the nodes in order to optimize them allows to reduce energy losses without additional costs for network modernization.

– результаты ИМ УЗЛОВ можно считать не противоречащими аналитическому расчету;

– критерий Фишера указывает на отсутствие в ИМ УЗЛОВ систематической погрешности;

– радиус доверительного интервала не превосходит допустимой погрешности.

Все пункты проверки расчета мощностей указывают на адекватность имитационной модели ИМ УЗЛОВ.

Для расчетного тока при выборе сечений линий результаты составили: $\bar{\Delta u} = 0,0017$; $s = 0,0011$, что указывает на достаточную точность расчета токов.

С помощью разработанной программы ИМ УЗЛОВ определяется N' наиболее эффективных вариантов организации электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта с наименьшими приведенными затратами на основании матрицы возможных электрических связей между трансформаторными подстанциями. ИМ ПЭ позволяет найти вариант организации электроснабжения с наименьшей величиной ТРЭТ с помощью метода статистических испытаний на основании рационального подбора оборудования. ИМ ПЭ используется для правильного выбора трансформаторов, кабельных или воздушных линий для ИМ УЗЛОВ. ИМ НАДЕЖН позволяет оценивать вероятность безотказной работы всей системы на основании данных о интенсивности отказов оборудования. Эта программа позволяет рассчитать вероятность безотказной работы ИМ ПЭ и N' наиболее эффективных вариантов ИМ УЗЛОВ. На основании полученной информации выявляются наиболее “узкие места” в различных вариантах схем электроснабжения, разрабатываются мероприятия по повышению надежности электроснабжения.

Результаты ИМ УЗЛОВ, ИМ ПЭ и ИМ НАДЕЖН являются исходной информацией для оценки наиболее эффективных решений с использованием весовых коэффициентов важности. Весовые коэффициенты могут быть определены с помощью регрессионного анализа или экспертного метода опроса.

Для Витебского узла с помощью представленных программ была определена схема питания потребителей, которая обеспечивает снижение потерь мощности в линиях 6–10 кВ на 10–11 %.

Список литературы

1 **Галушко, В. Н.** Математические модели в транспортных системах : учеб.-метод. пособие / В. Н. Галушко. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 154 с.

2 **Крюков, А. В.** Электрические сети районов электропитания нетяговых потребителей железнодорожного транспорта : учеб. пособие / А. В. Крюков. – Иркутск : ИрГУПС, 2008. – 55 с.