

УДК 629.7

В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, А. В. ДРОБОВ, А. П. МУЗОК, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

Рассмотрен разработанный программный комплекс повышения надежности систем электроснабжения железнодорожной отрасли за счет аналитического и имитационного моделирования.

Основными экономическими показателями при проектировании СЭС являются первоначальные (капитальные) вложения и ежегодные (текущие) расходы, основанные на методе срока окупаемости. К важным техническим показателям относятся надежность, удобство эксплуатации, долговечность сооружения, объем текущих и капитальных ремонтов, степень автоматизации и т. п. Экономические показатели во многих случаях являются решающими, однако при условии равноценности стоимостных показателей предпочтение следует отдать лучшему техническому решению.

При экономическом анализе надежности необходимо учитывать убытки (ущерб) от вероятного ежегодного перерыва электроснабжения потребителей, снижения качества напряжения. В связи с этим требуется прогнозировать убытки предприятий, обусловленных следующими причинами: недовыработкой продукции, вызывающей повышенный расход на ее компенсацию; брак продукции (частично или полностью); порчу оборудования (частично или полностью); расстройство технологического процесса; оплату простоя рабочим во время перерывов в электроснабжении.

Актуальность данного исследования нетяговых железнодорожных потребителей связана с большим физическим износом электрооборудующего оборудования. Более 25 % электрооборудования эксплуатируется свыше 20 лет, поэтому стоит задача повышения надежности СЭС путем модернизации и замены устаревшего оборудования (результаты энергетических обследований Барановичского вагонного депо и локомотивного депо г. Жлобина).

Надежность системы электроснабжения можно определить как способность этой системы и её отдельных элементов обеспечивать бесперебойное питание электроэнергией промышленное предприятие, не приводящее к срыву производства и авариям в электрической и технологической частях. Надежность характеризуется повреждаемостью оборудования, ожидаемой продолжительностью бесперебойной работы, длительностью перерыва питания электроэнергией, а также ущербом от перерыва питания и другими факторами.

Повреждаемость системы электроснабжения связана, в основном, с повреждаемостью электрооборудования из-за нарушения правильной его эксплуатации, некачественной ревизии и профилактики, ошибочных действий персонала, неблагоприятных условий окружающей среды.

С проблемой надежности в электроэнергетике связаны следующие практические задачи: статистическая оценка и анализ надежности действующего оборудования и установок; прогнозирование надежности оборудова-

ния и установок; нормирование уровня надежности; испытания на надежность; расчет и анализ надежности; оптимизация технических решений по обеспечению надежности при проектировании, создании и эксплуатации электротехнического оборудования, установок, систем; экономическая оценка надежности.

Теория надежности вводит в практику инженерного исследования количественные оценки, которые позволяют: устанавливать требования и нормативы надежности оборудования для установок и систем; сравнивать различные виды оборудования, установок и систем по их надежности; рассчитывать надежность установок по надежности их элементов; оптимизировать величину необходимого резерва и структуру технических объектов; выявлять наименее надежные элементы оборудования, установок и систем; оценивать сроки службы оборудования и установок.

Эксплуатация электрооборудования неизбежно сопряжена с постепенным его износом и, вследствие этого, с необходимостью его периодического ремонта. Для эффективного построения систем профилактических мероприятий, контроля, испытания, диагностики, текущих и капитальных ремонтов необходимо знание причин отказов электрооборудования. Нарастающая доля оборудования, исчерпавшего свой нормативный ресурс работы, в совокупности с негативными внешними воздействиями (перегрузки, перенапряжения, короткие замыкания и т.д.) способствует росту отказов. Необходимость прогнозирования разрушения элементов, оценка риска эксплуатации в условиях неполноты и неопределенности информации о качестве и состоянии оборудования являются постоянно действующими факторами.

В связи с этим повышение надежности электрооборудования за счет применения современного математического инструментария и оценки работоспособности СЭС с учетом изменяющихся условий эксплуатации является актуальной задачей исследования. Для достижения цели исследования поставлены и решены следующие задачи:

- произведен анализ условий эксплуатации электрооборудования, применяемого на предприятиях железнодорожной отрасли, а также изучены существующие подходы к анализу надежности электрических элементов и систем;
- собраны и систематизированы в базу данных уже имеющиеся теоретические сведения о влиянии различных внешних и внутренних факторов на надежность электрических элементов и систем;
- по результатам накопленных сведений, а также по проводимым натурным экспериментам создана библиотека взаимосвязи различных влияющих факторов на

показатели надежности электрических элементов и систем, а также на потребление электрической энергии электрооборудованием;

- произведена формализация результатов исследований надежности электрических систем и потребления электрической энергии электрооборудованием;

- разработана аналитическая программа и имитационная модель моделирования параметров надежности;

- выполнена верификация и проверка адекватности программного инструментария.

Современная система электроснабжения промышленного предприятия должна удовлетворять следующим основным требованиям: экономичности; надежности; безопасности; удобству эксплуатации; обеспечению надлежащего качества электроэнергии (уровней напряжения, стабильности частоты сети и т.п.); необходимой гибкости, обеспечивающей возможность расширения при развитии предприятия.

Важные дополнительные требования к системам электроснабжения предъявляют: электроприемники с резкопеременной циклически повторяющейся ударной нагрузкой (мощные асинхронные двигатели, электрический обогрев); электроприемники непрерывного производства, требующие бесперебойности питания при всех режимах системы электроснабжения (автоматическая блокировка).

При реконструкции и проектировании системы электроснабжения учитывают многочисленные факторы: потребляемую мощность; категорию надежности питания отдельных электроприемников; графики и характер нагрузок крупных потребителей; размещение электрических нагрузок на генплане предприятия; число и мощность подстанций и других пунктов электропотребления; напряжение потребителей и ограничения токов КЗ; число, расположение, мощность, напряжение и другие параметры источников питания; требования энергетической системы; требования аварийного и послеварийного режимов; степень загрязненности среды; условия выполнения простой и надежной релейной защиты, автоматики и телемеханики и др.

Оценивание надежности по результатам эксплуатации возможно при своевременном поступлении достоверной информации об отказах и соответствующей обработке ее специальной службой надежности.

Все данные заносят в документацию системы первичного учета отказов: журнал учета работы электрооборудования, карточку учета отказов, итоговый документ о наработке и отказах электроустановок (ЭУ). Информация о работе элементов ЭУ, получаемую от эксплуатационников, должна соответствовать требованиям достоверности и полноты. Достоверность информации достигается объективностью представленного материала и подготовленностью обслуживающего персонала. Под объективностью понимается своевременное заполнение карточек об отказах и журналов учета работы с точным указанием их причин, ошибок обслуживающего персонала либо конструктивных недоделок. Необъективность материала – результат либо халатности, некомпетентности обслуживающего персонала или просто субъективности оценки.

Полнота информации зависит от точного описания отказов и их причин, т.е. качества подготовки персонала и ясности инструкции по эксплуатации элементов ЭУ.

Для решения тех или иных задач по программам повышения надежности требуется определенный объем сведений, в том числе данные о времени обнаружения отказа, внешнего поведения отказа, времени, затрачиваемом на отыскание и устранение причины отказа, о типе и характеристиках отказавшего элемента ЭУ, месте его в схеме и о времени наработки элемента до отказа.

На основании анализа надежности оборудования по данным эксплуатации разрабатывается перечень мероприятий, необходимых для исключения выявленных причин отказов.

Электроустановки, используемые для преобразования, передачи и распределения электроэнергии, подвергаются воздействию большого количества факторов, которые можно подразделить на четыре группы: воздействия окружающей среды, эксплуатационные, случайные, ошибки проектирования и монтажа.

К факторам окружающей среды, где функционируют элементы ЭУ, относятся интенсивность грозовой и ветровой деятельности, гололедные отложения, обложные дожди, мокрый снег, густой туман, изморозь, роса, солнечная радиация и другие.

Применительно к передаточным устройствам – воздушные линии всех классов напряжений – наиболее характерными факторами, способствующими их отказам, являются морозящий дождь, мокрый снег, густой туман, изморозь и роса, а у силовых трансформаторов, установленных на электроустановках открытого типа, к факторам окружающей среды относятся солнечная радиация, атмосферное давление, температура окружающей среды.

К эксплуатационным факторам относятся перегрузки элементов ЭУ, токи коротких замыканий, различные виды перенапряжений. Согласно правилам технической эксплуатации воздушные линии 10–35 кВ с изолированной нейтралью допускается эксплуатировать при наличии однофазного замыкания на землю, а длительность их устранения не нормируется. При таких условиях эксплуатации дуговые замыкания в разветвленных распределительных сетях являются основной причиной повреждения ослабленной изоляции. Для силовых трансформаторов наиболее чувствительными из эксплуатационных факторов являются их перегрузка, механические усилия на обмотках при сквозных токах коротких замыканий. Значительное место в эксплуатационных факторах занимает квалификация персонала.

Небольшую группу влияющих на показатели надежности электроустановок в эксплуатации составляют случайные факторы: наезд транспорта на опоры, обрыв провода и т.п. Целью исследования взаимодействия ЭУ с воздействующими факторами является разработка технических, организационных и экономических мероприятий, направленных на повышение надежности элементов ЭУ. Применительно к взаимодействию ЭУ с факторами окружающей среды региона необходимо выяснить характер и причины взаимного влияния, количественную и качественную оценки, рассмотреть поток отказов из-за воздействующих факторов с учетом пространства и времени.

Наибольшее число отказов – это обрыв проводов и кабелей в местах контакта. В таблице 1 представлены часто повторяющиеся отказы в оборудовании рассмотренных систем электроснабжения.

Таблица 1 – Соотношение повреждений к общему числу неисправностей

Основные неисправности	Количество неисправностей к общему числу отказов в системе, %
Воздушные линии	18,1
Кабельные линии	32,3
Трансформатор	5,3
Итого	55,7

Аналитическая программа анализа надежности. Одна из основных задач теории надежности – определение показателей надежности систем по известным значениям показателей надежности ее элементов. Для решения данной задачи нужно, прежде всего, формально описать условия работоспособности системы в зависимости от условий работоспособности ее элементов. Это можно сделать несколькими способами: словесным описанием; графически (например, с помощью структурной схемы надежности, дерева отказов или графа состояний); аналитически (с помощью, например, функций алгебры логики); имитационным моделированием объекта исследования.

Применение схемы с постоянным резервированием и АВР на секционном выключателе повышает бесперебойность электроснабжения потребителей. Кроме того, секционирование уменьшает вероятность полного погашения всех потребителей. При отсутствии секционирования отказ любого выключателя приводит к полному погашению секции и вместе с ней всех потребителей, а при наличии секционирования – к погашению только половины.

На стадии проектирования СЭС для обеспечения требуемой надежности приходится во многих случаях как минимум дублировать отдельные элементы и даже отдельные системы, т.е. использовать резервирование, которое характерно тем, что оно позволяет повысить надежность системы по сравнению с надежностью составляющих ее элементов. Повышение надежности отдельно взятых элементов требует больших материальных затрат. В этих условиях резервирование, например, за счет введения дополнительных элементов является эффективным средством обеспечения требуемой

надежности систем. Если при последовательном соединении элементов общая надежность системы (т.е. вероятность безотказной работы) ниже надежности самого ненадежного элемента, то при резервировании общая надежность системы может быть выше надежности самого надежного элемента.

Для однолинейных схем железнодорожного электроснабжения, линий автоматической блокировки и продольного электроснабжения, сетей железнодорожных узлов дистанций электроснабжения, содержащих относительно небольшое число элементов (от 30 до 1000), реализована программа аналитического расчета, основанная на преобразовании последовательного и параллельного соединений элементов с различными интенсивностями отказов и времени восстановления. Пример реализации представлен на рисунке 1, а пример библиотеки данных о показателях надежности приведен в таблице 2.



Рисунок 1 – Рабочее окно программы расчета параметров надежности

Для существующей и альтернативной схемы электроснабжения узла Гомельской дистанции электроснабжения на рисунке 2 представлены упрощенные схемы замещения с учетом расположения объектов в пространстве. При формировании альтернативной схемы электроснабжения использовался критерий минимума длины линий, так как это наиболее значимый фактор с точки зрения интенсивности отказов. Сравнительные результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Пример заполнения показателей надежности элементов трансформаторной подстанции

Название элемента	λ , год ⁻¹	$T_{в}$, ч	Источник данных
Трансформатор силовой	0,035	8	Показатели надежности схем городской электрической сети для питания потребителей второй и третьей категории. Репозиторий Белорусского национального технического университета [Электронный ресурс]
Кабельная линия на 1 км	0,1	25	
Разъединитель	0,08	4,5	
Сборная шина	0,09	2	
Выключатель масляный	0,015	9	
Выключатель вакуумный	0,004	8	
Предохранитель	0,02	2	
Выключатель нагрузки	0,01	12	Галушко, В. Н. Надежность электроустановок и энергетических систем : учеб.-метод. пособие / В. Н. Галушко, С. Г. Додолев. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 154 с.
Трансформатор тока	$3,3 \cdot 10^{-6}$	3	
Трансформатор напряжения	0,0072	3	

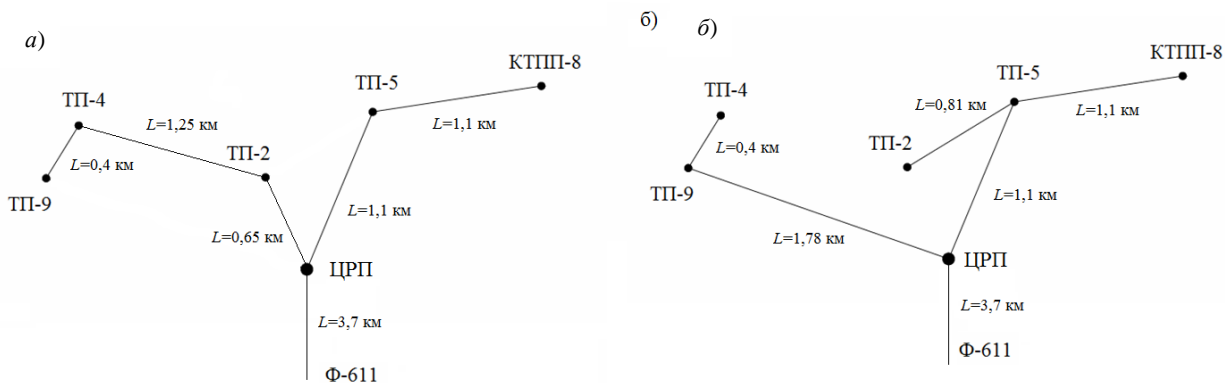


Рисунок 2 – Упрощенные схемы замещения: исходная (а) и предлагаемая (б)

Таблица 3 – Показатели расчета схемы электроснабжения

Параметр	Исходная схема	Альтернативная схема
Средняя интенсивность отказов, год ⁻¹	1,706	1,596
Среднее вероятное время восстановления, ч	16,539	16,435
Вероятность безотказной работы в год, %	18,200	20,300

Имитационная модель анализа надежности. Имитационное моделирование (ИМ) – метод научного исследования систем, для которого характерно воспроизведение процессов функционирования элементов системы с сохранением их алгоритмов, причинно-следственных связей, последовательности протекания и вероятностного характера. Так, в процессе имитации с помощью генератора случайных чисел разыгрываются моменты наступления и виды отказов некоторых элементов и проверяются условия работоспособности системы в этот момент. Если существующие отказы элементов не нарушают условий работоспособности системы, то разыгрываются очередные отказы. Наряду с моделированием отказов имитируются процессы восстановления отказавших элементов. В процессе имитации отслеживаются и фиксируются определенные события и состояния системы (наработка до отказа, продолжительность восстановления и др.), по которым оцениваются показатели надежности системы.

При создании ИМ могут быть учтены: структура исследуемой системы и возможности её модификации; различные режимы функционирования системы и их характеристики; условия, накладываемые на зависимость отказов элементов.

В ИМ могут быть реализованы произвольные вероятностные закономерности надежности свойств элементов и воздействий на систему. Поэтому стандарты [1] определяют имитационное моделирование в качестве наиболее универсального метода исследования надежности систем.

Другими достоинствами ИМ является возможность [2, 3] рассматривать различные варианты системы, отвечающие разным сторонам функционирования и возможным структурным преобразованиям; имитировать большое число отказов аппаратных и программных средств, что практически неосуществимо при натуральных испытаниях; оценивать значения всех необходимых количественных показателей надежности; создавать во время испытаний всё множество технологических ситуаций; проводить испытания модели системы в ускоренном или замедленном машинном времени; использовать

ИМ в качестве тренажера для отработки навыков принятия технических и управленческих решений.

Метод ИМ заключается в создании логико-аналитической (математической модели системы и внешних воздействий) имитации функционирования системы, т.е. в определении временных изменений состояния системы под влиянием внешних воздействий и в получении выборок значений выходных параметров, по которым определяются их основные вероятностные характеристики.

Использование ИМ для расчёта надёжности сложных технических систем основано на том, что процесс их функционирования представляется математической вероятностной моделью, отражающей в реальном масштабе времени все события (отказы, восстановления), происходящие в системе. С помощью такой модели программными средствами многократно моделируется процесс функционирования системы, и по полученным результатам определяются искомые статистические характеристики этого процесса, являющиеся показателями надёжности.

Применение методов имитационного моделирования позволяет учитывать зависимые отказы, произвольные законы распределения случайных величин и другие факторы, влияющие на надёжность. Однако эти методы, как и любые другие численные методы, дают лишь частное решение поставленной задачи, соответствующее конкретным (частным) исходным данным, не позволяя получить показатели надёжности в функции времени. Поэтому для проведения всестороннего анализа надёжности приходится многократно моделировать процесс функционирования системы с разными исходными данными. В нашем случае это прежде всего различная структура электрической системы, различные значения вероятностей отказа и длительностей безотказной работы, которые могут изменяться в процессе эксплуатации системы, и другие показатели функционирования.

Этап анализа результатов модельных экспериментов на имитационной модели СЭС при анализе различных альтернативных вариантов электроснабжения реализуется последовательностью шагов: оценка надежности всей системы и каждого потребителя в отдельности с помощью

множества откликов при изменении параметров процесса; выбор рационального варианта организации СЭС с точки зрения надежности; поиск «узких» мест в СЭС.

В качестве входных данных задаются названия элементов СЭС и их параметры надежности, количество проводимых автоматически модельных экспериментов.

В качестве откликов ИМ использовались вероятности безотказной работы: для каждого источника и потребителя; всех источников; всех потребителей; всей системы с учетом важности влияния каждого из элементов СЭС за счет весовых коэффициентов.

По вектору интегральных откликов определяется значение обобщенного показателя надежности, вычисляемое по способу весовых коэффициентов или усредненное значение для всей СЭС.

При поиске «узких мест» рассматривались два уровня СЭС различных вариантов организации СЭС – источники и потребители. В качестве источника информации может быть Комплекс автоматизированного диспетчерского управления (рисунок 3) и другие программы, использующиеся для анализа текущего электрообеспечения.

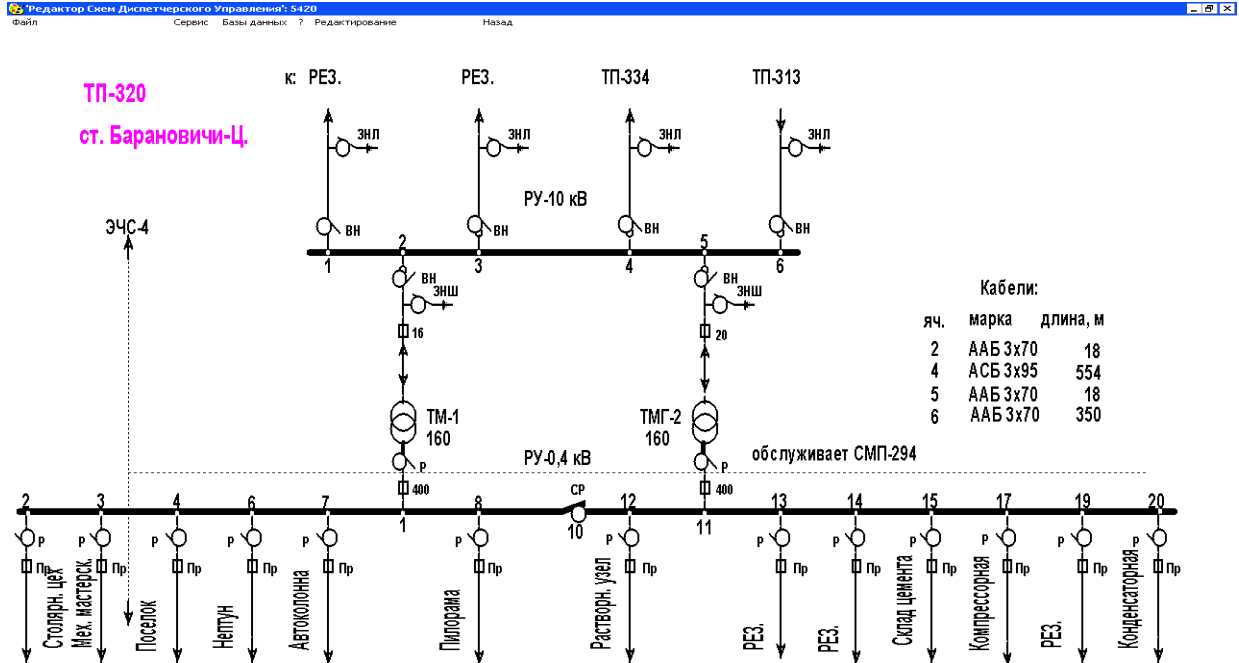


Рисунок 3 – Пример комплекса автоматизированного диспетчерского управления

Рассмотрим формальное описание ИМ. После заполнения ячеек матрицы для каждого элемента ее содержимого, характеризующегося определенной вероятностью безотказной работы, с помощью генераторов псевдослучайных чисел на каждый элемент разыгрывается случайное число, определяющее его состояние. После розыгрыша каждый элемент схемы (системы) принимает одно из двух логических значений, а именно исправен ($a_i = 1$) или неисправен ($a_i = 0$). Таким образом,

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{если значение розыгрыша} \geq p_{ин}; \\ 1, & \text{если значение розыгрыша} < p_{ин}, \end{cases}$$

где $p_{ин}$ – нормативная вероятность безотказной работы i -го элемента.

Любой i -й элемент системы может принадлежать нескольким j -м путям и занимать в них одно l -е место. Тогда логическое состояние j -го пути определяется как

$$T_j = \bigwedge_{l=1}^{K_j} a_{j,l},$$

где K_j – количество элементов в j -м пути; $a_{j,l}$ – логическое состояние l -го элемента в j -м пути.

Эта формула представляет собой перемножение логических состояний элементов, входящих в путь, и

означает, что j -й путь исправен только тогда, когда работоспособны все элементы, принадлежащие пути.

Логическое состояние всей системы R в s -м розыгрыше будет представлять собой сумму логических состояний минимальных путей

$$R_s = \bigwedge_{j=1}^M T_j,$$

где M – максимальное число минимальных путей для выбранной схемы; T_j – логическое состояние j -го минимального пути.

Это означает, что если исправен хотя бы один путь, то работоспособна система в целом.

Полученные для каждого розыгрыша результаты, позволяют определить вероятность безотказной работы системы для определенного промежутка времени

$$\lambda_p = \sum_{s=1}^N R_s / N,$$

где D – число произведенных розыгрышей; s – номер розыгрыша.

Для реализации имитационной модели с помощью ПТКИ использовался язык программирования Java (рисунок 4).

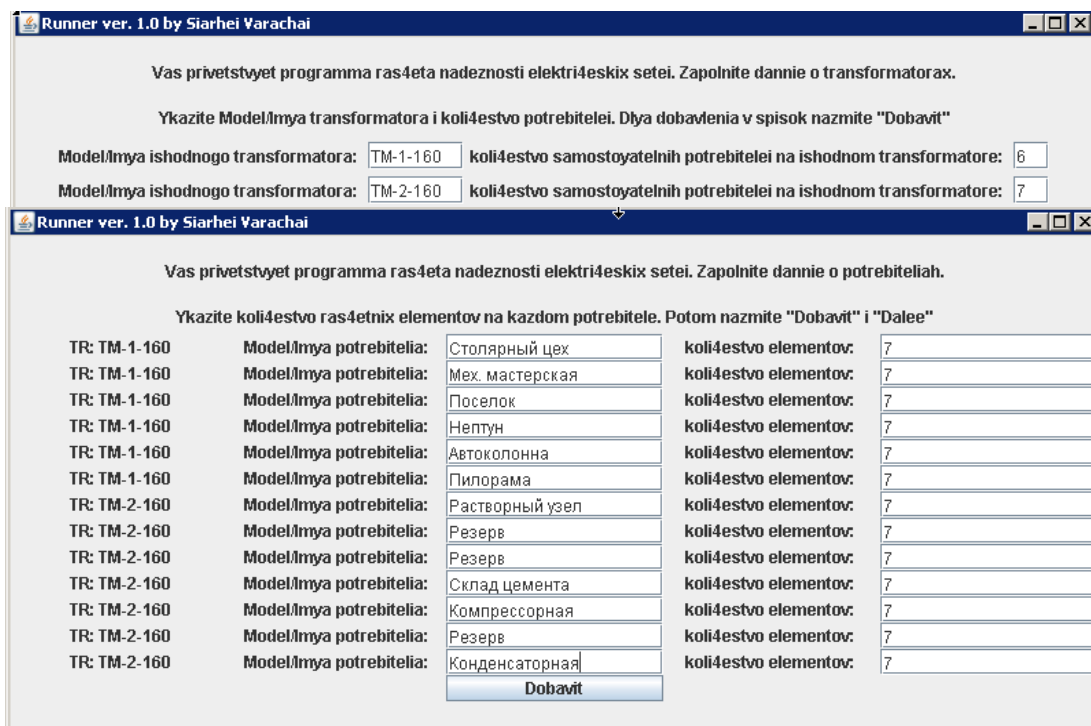


Рисунок 4 – Пример этапов реализации имитационной модели СЭС

Основные допущения при имитационном моделировании: перерывы электроснабжения, ликвидируемые работой автоматики (АПВ, АВР), не учитываются. Устройства релейной защиты считаются действующими безотказно; расчетные схемы для всех видов отключений составляются отдельно для каждого потребителя или (и) групп потребителей.

Перечислим основные пути повышения надежности систем электроснабжения.

1 Рациональное резервирование:

– в цеховых сетях по высокому (ВН) или низкому (НН) напряжению в трансформаторных подстанциях (ТП);

– за счет раздельной или параллельной работы линий, трансформаторов в зависимости от условий эксплуатации;

– за счет выбора числа независимых источников питания с учетом категории потребителей.

2 Использование перегрузочной способности элементов системы электроснабжения, что обеспечивает надежное питание потребителей при эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий. Режимы перегрузки особенно важны при повреждениях или отключениях линий, трансформаторов, секций шин, отдельных аппаратов.

Исследования, проведенные различными организациями по допустимой перегрузке электрооборудования, показали следующее:

а) кратковременная (до 2–2,5 ч) перегрузочная способность выключателей ВН может быть принята равной 125 % номинальной;

б) для выключателей нагрузки (ВНП) допустимы такие же перегрузки, как для силовых масляных и сухих трансформаторов;

в) для проходных изоляторов, работающих в диапазоне температур от -50 до $+60$ °С, допустимая перегрузка составляет $(0,85-1,73) I_{ном}$;

г) перегрузка воздушных линий возможна практически всегда при сохранении нормального габарита до земли и составляет 30–35 %;

д) допустимая перегрузка кабельных линий напряжением до 10 кВ зависит от значения и длительности максимума нагрузки линии в нормальном режиме и от способа их прокладки.

3 Совершенствование технического обслуживания: оптимизация периодичности и глубины капитальных ремонтов, снижение продолжительности аварийных ремонтов.

4 Повышение качества ремонта оборудования, что увеличивает межремонтные сроки, снижает затраты труда и материальных средств. Такой ремонт должен производиться квалифицированным персоналом, хорошо знающим конструкцию оборудования, современную технологию ремонта, а также обладающим высокой профессиональной подготовкой и практическими навыками.

5 Применение, правильный выбор и компоновка современного оборудования. Выбранное оборудование должно быть устойчиво к действиям токов КЗ. Что касается компоновки, то при особенно высоких требованиях к надежности электроснабжения секции РУ располагают в разных помещениях.

6 Внедрение автоматизации и телемеханизации, что позволяет повысить безопасность обслуживания, эффективность управления объектами электроснабжения и избежать ошибочных действий персонала.

7 Повышение надежности релейной защиты и автоматики за счет применения микропроцессорной элементной базы, правильной эксплуатации и технического обслуживания.

При применении микропроцессорных устройств РЗ в системах электроснабжения наравне с релейно-контактными устройствами особое внимание необходимо обращать на готовность этой системы по обеспечению электромагнитной совместимости.

При эксплуатации газовой защиты трансформаторов возможна ее ложная работа, которая может иметь место при попадании воздуха в бак трансформатора (при доливке масла, после ремонта системы охлаждения).

При применении интегральной и цифровой защиты необходимо строго выполнять указания по ее эксплуатации. Так, например, если не применять специальных мер (экранирование и пр.), то возникающие по разным причинам помехи могут вызвать ложное срабатывание защиты.

8 Выбор наиболее целесообразного времени вывода оборудования в ремонт, а именно совмещение ППР электрооборудования с ППР технологического оборудования, заблаговременный перевод электроснабжения на временное питание от резервных источников и др. Например, плановый ремонт одного из двух трансформаторов двухтрансформаторной ТП целесообразнее проводить в период работы со сниженной нагрузкой.

9 Уменьшение числа трансформаций, где это возможно, и в первую очередь трансформаций 10/6 кВ, что повышает также экономичность системы электроснабжения за счет уменьшения потерь электроэнергии.

10 Применение самозапуска ответственных двигателей (АД и СД). Самозапуск необходим для обеспечения устойчивости технологических процессов непрерывных производств при КЗ, отключениях выключателя в цепи питания узла нагрузки и т.д. Самозапуск возникает после кратковременного перерыва и автоматического восстановления электроснабжения. Двигатели, участвующие в самозапуске, при кратковременных перерывах электроснабжения от сети не отключаются.

11 Обеспечение пожарной безопасности электротехнических сооружений (подстанций, кабельных туннелей и др.), внедрение устройств телесигнализации и локализации пожаров.

12 Использование гарантированных источников питания (дизель-генераторов, аккумуляторных батарей и т.п.).

13 Внедрение ремонтов под напряжением.

14 Снижение насыщения сетей автоматической коммутационной аппаратурой, так как сами аппараты могут быть источником аварий.

15 Компенсация реактивной мощности. За счет данного мероприятия по НН можно разгрузить цеховой трансформатор ТП и при росте нагрузки загрузить его дополнительно активной мощностью.

16 Повышение статической и динамической устойчивости системы электроснабжения. Наиболее прием-

лемым средством достижения этой цели является уменьшение времени действия устройств РЗ.

17 Повышение качества электроэнергии. Снижения несимметрии напряжений можно достичь, как показывает опыт эксплуатации систем электроснабжения, в основном двумя путями:

– рациональным пофазным распределением однофазных нагрузок;

– применением симметрирующих устройств.

Для снижения несинусоидальности напряжений применяют следующие средства:

– раздельное питание приемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой и обычных общепромышленных приемников, которое осуществляют от разных секций шин подстанций;

– увеличение числа фаз выпрямления; так, при переходе от 6-фазной схемы к 12-фазной выпрямления несинусоидальность напряжений сети уменьшается примерно в 1,4 раза;

– фильтры высших гармоник, которые могут одновременно использоваться для компенсации реактивной мощности.

18 Совершенствование конструкций и материалов, из которых изготавливают электрооборудование для систем электроснабжения.

19 Повышение качества и уровня эксплуатации электрооборудования (правильное применение смазочных материалов, своевременная чистка светильников, правильная замена изношенных деталей и др.).

Практическое применение аналитической программы и имитационной модели электроснабжения заключается в определении наиболее надежных схем. Результаты исследования позволяют: прогнозировать показатели надежности электрооборудования СЭС; установить «узкие места» в обеспечении надежности; разработать мероприятия по повышению эффективности функционирования электрооборудования.

Список литературы

1 Жаднов, В. В. Современные проблемы автоматизации расчетов надежности / В. В. Жаднов, И. В. Жаднов, С. Н. Полесский // Надежность. – 2007. – № 2 (21). – С. 3–12.

2 Максимей, И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И. В. Максимей. – М.: Радио и связь, 1988. – 232 с.

3 Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики / под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1997. – 288 с.

Получено 1.09.2017

V. N. Galushko, A. V. Drobov, A. P. Muzok. Program complex of system reliability analysis electric supply of railway industry.

The developed program complex of reliability increase of power supply systems of railway branch due to analytical and simulation modeling is considered.