



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2017.5.7>

УДК 338.47:657:005.962.131

ББК 65.386

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПОСЛЕДСТВИЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ КОМПАНИЙ

**Ирина Витальевна Усачева**

Кандидат экономических наук,  
доцент кафедры математических методов и информатики в экономике,  
Волгоградский государственный университет  
Zepelin89@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Анна Вячеславовна Волкова**

Старший преподаватель кафедры математических методов и информатики в экономике,  
Волгоградский государственный университет  
a.v.volkova@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью данной работы является разработка автоматизированной системы принятия решений по управлению качеством электроэнергии, а также диагностики и управления электрооборудованием. Создание интеллектуальной автоматизированной системы управления техническими активами энергетических предприятий в современных условиях высокого износа электросетевого оборудования с учетом изменившейся рыночной конъюнктуры является весьма актуальной задачей. Система направлена на решение задачи оптимизации стратегии модернизации электросетевого оборудования компании, которая на текущий момент достаточно остро стоит для владельцев электросетевых компаний в связи с высокой степенью износа оборудования и существенными потерями электроэнергии в сетях среднего и низкого напряжения во время ее передачи. Решение данной научно-технической задачи позволит существенно снизить финансовые издержки компании при модернизации электросетевого оборудования, сделать процесс обновления основных фондов более прозрачным и финансово эффективным. Эффект от реализации поставленной задачи позволит получать достаточно достоверные сведения для управления техническими активами на основе любой агрегированной доступной информации, в независимости от типа и вида информации, а также оптимизировать финансовые потери при модернизации электросетевого оборудования, и как следствие повысить гибкость компании в формировании тарифов (экономический эффект для энергоемкого бизнеса в целом). В работе проведены теоретические исследования в области параметров качества электрической энергии и надежности оборудования, в частности зависимости производительности и безопасности оборудования, в том числе электрооборудования, от параметров качества электроэнергии. Показаны способы их расчета и приведен перечень параметров, который будет использован для создания массивов данных и использования в программном продукте,

с помощью которых можно будет осуществлять мониторинг оборудования и принимать решение по проведению ремонтных работ.

**Ключевые слова:** надежность и качество электроэнергии, электрические сети, электроэнергия, массивы данных, система диагностики электротехнического оборудования.

### **Введение**

Нынешняя энергосистема страны характеризуется недостаточной надежностью, – электроэнергетические системы регионов обладают низким уровнем резервирования генерирующих мощностей и не обеспечивают устойчивое электроэнергетическое обеспечение территорий, а износ основных производственных фондов региональных систем электроэнергетики, достигающий 80 %, увеличивает вероятность чрезвычайных ситуаций.

Мероприятия по повышению устойчивости функционирования на объектах региональных систем электроэнергетики сводятся к соблюдению требований нормативных документов, что недостаточно для обеспечения надежного электроснабжения потребителей, при этом только у 1 % потребителей имеются свои энергетические службы, отвечающие за бесперебойное электроснабжение, в то время как последствия отключений в сети всегда связаны с недостаточностью оборудования энергетических объектов и территорий на длительное время.

Рациональное управление хозяйственным комплексом любого предприятия требует постоянной оптимизации, а также оценки, то есть постановки на предприятии комплексной системы мониторинга характеристик, отражающих соотношение затрат энергетических ресурсов к полезному эффекту от их использования, применительно к отдельным установкам, продукции, технологическому процессу и к предприятию в целом. Оценка и моделирование способности энергетического хозяйства выполнять свои функции при минимальных затратах энергетических и иных ресурсов является важным элементом по повышению энергоэффективности предприятия.

Однако в настоящее время фактически отсутствуют работы, посвященные разработке методов обоснования мероприятий, средств и способов обеспечения устойчивого функционирования объектов электросетевого комплекса – имеются только исследования, посвященные реализации отдельных требований к уровням электроэнергетической системы региона, однако существующие методики не могут применяться для рассматриваемых задач без изменений, дополнений и уточнений, что требует разработки соответствующих математических моделей и анализа текущего состояния надежности электроснабжения.

В рамках работы предполагается разработка новой концепции управления техническими активами энергетических предприятий на основе системы оценки потерь электроэнергии в сетях и затрат на их компенсацию. Реализация указанной системы основана на теории и методах нечеткой логики, а также классических методах математического моделирования в задачах энергетики. Так как разрабатываемая система позиционируется в качестве экспертной системы, выполняющей роль «помощника-советника», то на основе результатов, полученных в ходе работы этой системы, формируется совокупность решений рекомендаций для оптимизации стратегии поведения электросетевой компании.

### **Методика исследования**

Техническими параметрами электроэнергии, которые влияют на работу организаций-потребителей, являются качество и надежность. Качество работы магистральных и распределительных сетей имеет прямое влияние на технологические возможности потребителей, поэтому основная задача электроснабжения – это обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителя электрической энергией в заданном объеме и заданного качества.

Понятие «качество электроснабжения» появилось относительно недавно и представляет собой интегральную характеристику, включающую в себя показатели надежности электроснабжения, качества электрической энергии и энергоэффективности [8].

В настоящее время методики анализа качества электроснабжения не разработаны, потребитель самостоятельно выбирает контролируемые параметры и соответственно уровень качества электроснабжения, который не должен противоречить требованиям существующих нормативно-технических документов.

Определение качества товаров и услуг осуществляется по совокупности формальных признаков, установленных нормативными документами и субъективным восприятием потребителя, созданного на основе собственных представлений о степени удовлетворения потребностей. В рамках российского электроэнергетического рынка товаром является электрическая энергия, а сам процесс электроснабжения – услугой.

Показатели качества электрической энергии в Российской Федерации устанавливаются в соответствии с нормативными документами [1] и должны отражаться в договорах на снабжение электрической энергии. При заключении данных договоров следует в том числе указывать допустимые параметры показателей качества электроэнергии в точке передачи. Введение ГОСТ 32144-2013 [1] способствовало решению проблемы поставки электрической энергии надлежащего качества, что при нынешнем состоянии энергетических систем актуально как для организаций энергоснабжения, так и для потребителей. На сегодняшний день всем сторонам систем электроснабжения следует учитывать зависимость затрат при работах электрооборудования, бесперебойность и безопасность электроснабжения, количество выпускаемой продукции и его качество, зависящее от качества электрической энергии в распределительных сетях [9].

Показатели качества электроэнергии, характеризующие помехи, такие как отклонения частоты, медленные изменения напряжения, искажения синусоиды кривой напряжения, асимметрия и колебания напряжения, имеют нормированные значения в виде показателей и норм качества электроэнергии. При этом быстротечные прерывания напряжения, импульсные напряжения, перенапряжения, провалы напряжения не нормируются в настоящее время, по ним лишь приводятся справочные данные. В связи с этим обусловлена необходимость включения в систему оценки и измерения таких параметров, как амплитуда, длительность и частота, которые характеризуют конкретную электрическую сеть в отношении возможности проявления кратковременных помех. При этом все измерения необходимо проводить в точке передачи электрической энергии, которая находится на месте раздела объектов электроэнергетики между собственниками линий передачи.

Показателем качества электрической энергии, который относится к частоте, является отклонение значения основной частоты напряжения от ее номинального значения, измеряемое в герцах, при этом значение основной частоты напряжения измеряется на каждом временном отрезке, длительностью 10 с. Так как частота переменного тока зачастую не равна точно 50 или 60 Гц в рамках десятисекундного интервала, число данных периодов может не являться целым числом. Измеренная основная частота представляет собой отношение числа целых периодов, зафиксированных в десятисекундном интервале, к продолжительности этих периодов. Также необходимо указать, что при измерении частоты следует использовать опорный канал, неопределенность измерений которого в области значений влияющих величин не должна превышать  $\pm 0,01$  в промежутке от 42,5 до 57,5 Гц и от 51 до 69 Гц, и не использовать маркированные данные.

Для частоты напряжения в электросети определены следующие нормативы качества электрической энергии [1, с. 5–6]:

- в синхронизированных системах электроснабжения отклонение не должно отличаться на  $\pm 0,2$  Гц в 95 % времени интервала за одну неделю, но не более чем на  $\pm 0,4$  Гц;
- в изолированных системах электроснабжения отклонение с автономными генераторами тока, не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии, не может отличаться более чем на 1 Гц в течение 95 % времени интервала за одну неделю, но и не более чем на 5 Гц в течение всей недели.

Медленные изменения напряжения электрического питания, обычно не менее одной минуты, вызываемые изменениями нагрузки в электросети, также являются показателями качества электроэнергии и выражаются в процентах. Они представляют собой положительное и отрицательное отклонения напряжения от номинального значения для сетей низкого напряжения или согласованного значения для сетей среднего и высокого напряжений.

В электросетях низкого напряжения стандартное номинальное напряжение электропитания составляет 220 В (между нейтральным и фазным проводниками для однофазных и четырехпроводных трехфазных систем) и 380 В (для трехфазных трехпроводных и четырехпроводных между фазными проводниками). Как положительные, так и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электроэнергии не могут превышать 10 % номинального либо согласованного значения напряжения в течение всего временного интервала длительностью в одну неделю.

В точках общего присоединения необходимые значения отрицательного и положительного отклонений напряжения в точках передачи электрической энергии следует устанавливать сетевой организации для выполнения существующих норм и правил [1, с. 6]. При этом потребитель в своей электросети должен обеспечить условия, когда отклонения напряжения питания на зажимах приемников электрической энергии не выше установленных для них допустимых значений.

Колебания напряжения электропитания, длящиеся обычно не более одной минуты, включая быстрые одиночные изменения напряжения, продуцируют фликер, то есть ощущение неустойчивости визуального восприятия, вызываемое источником света, чей спектральный состав или яркость изменяются. Показателем качества электроэнергии, относящимся к одиночным быстрым колебаниям напряжения, является кратковременная доза фликера, обозначаемая как  $P_{st}$ , измеряемая в течение десяти минут, и длительная доза фликера, записываемая сокращением  $P_{lt}$ , длительность интервала измерений которой составляет два часа.

Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения для кратковременной дозы фликера не более 1,38, а для длительной дозы фликера не выше значения 1,0 [1, с. 6–7]. Для оценки соответствия качества электрической энергии вышеуказанным нормам следует проводить измерения с помощью фликометра [3, с. 5]. Необходимо отметить, что маркированные данные при данных измерениях не учитываются и для задачи по разработке системы оценки экономической эффективности эксплуатации и модернизации электросетевого оборудования следует использовать приборы цифрового вида. Статистический анализ при этом заключается в процедуре разбиения амплитуды сигнала, который характеризует значение фликера, на заданное число классов, в случае когда уровень фликера достигает определенного значения, счетчик заданного класса добавляет единицу к имеющемуся значению и функция частотного распределения значений  $P_{inst}$  определяется. При использовании высокой частоты опроса в конце интервала измерения получается окончательный результат, представляющий распределение, для каждого класса, длительностей уровней фликера. При суммировании показаний счетчиков всех классов и, используя отношение показаний счетчиков каждого из классов к общей сумме, получается функция плотности вероятности уровня фликера, из которой можно получить интегральную функцию вероятности, используемую для статистического анализа зависимости уровня фликера от времени.

На рисунках 1 и 2 графически показан метод статистического анализа, упрощенный для простоты расчетов кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  до 15 классов.

С использованием интегральной функции вероятности могут быть получены основные статистические характеристики фликера, такие как среднее значение, стандартное отклонение, уровень фликера, превышаемый в заданной части интервала наблюдения (в процентах), и относительное время, в течение которого уровень фликера превышает заданное значение. При проведении статистического анализа после получения значения кратковременной дозы фликера сразу производится анализ дальнейшего временного интервала, а результаты предыдущего направляются на выход фликерметра. При обработке значений длительной дозы фликера конечный результат получается вместе с результатами измерений на кратковременных интервалах.

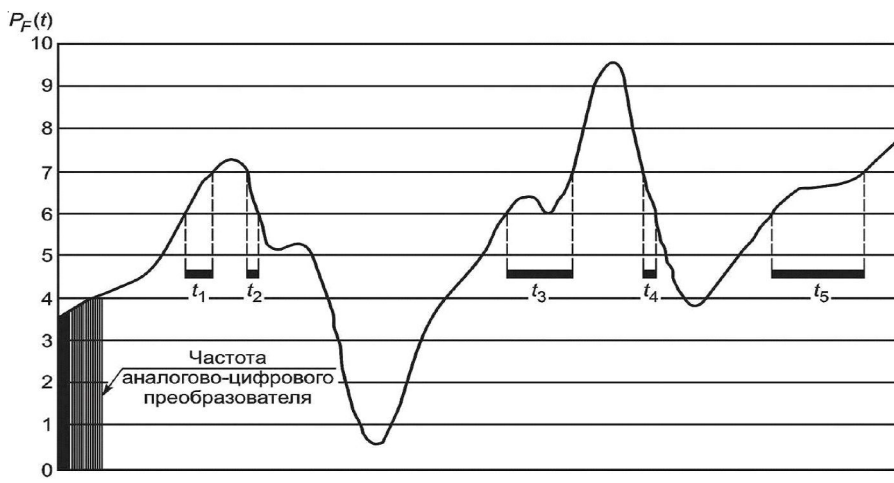


Рис. 1. Зависимость уровня фликера от времени в классе 7 [3]



Рис. 2. Интегральная функция вероятности [3]

Представление данных, а именно их отображение и регистрацию, обеспечивает интерфейс с цифровыми или аналоговыми сигналами. Для формирования базы данных параметров качества электрической энергии предполагается использовать данные средств измерения из точек присоединения, используя каналы связи между средствами измерений цифрового типа и микропроцессорной системой. В массив данных параметров качества электроэнергии необходимо внести показатели, указанные в таблице. Общая продолжительность мониторинга параметров качества электрической энергии составит одну неделю.

**Массив данных показателей качества электрической энергии**

Параметр качества электрической энергии	Единица измерения	Временной интервал измерения
Отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения, $df$	Гц	10 с
Отклонение значения напряжения электропитания от номинального значения, $du$	%	10 мин
Кратковременная доза фликера, $pst$	–	10 мин
Длительная доза фликера, $plt$	–	2 ч
Коэффициент гармонических составляющих напряжения, $k02$	%	10 мин
Коэффициент гармонических составляющих напряжения, $k40$	%	10 мин

Окончание таблицы

Параметр качества электрической энергии	Единица измерения	Временной интервал измерения
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, $k_u$	%	10 мин
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности для трехфазной системы, $k_{2u}$	%	10 мин
Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности для трехфазной системы, $k_{0u}$	%	10 мин
Прерывания напряжения, $vd0$	с	*
Провалы напряжения, $vd$	с	*
Перенапряжения, $vs$	с	*
Импульсное напряжение, $ui$	кВ	5 мс

Примечание. \* – 0,02 с для систем электроснабжения частотой 50 Гц и 0,01(6) с для систем электроснабжения частотой 60 Гц.

### Модель и полученные результаты

Для решения задачи по нахождению оптимальной стратегии модернизации электросетевого оборудования организаций требуется произвести анализ воздействия параметров работы энергоустановок и функционирования иных компонентов энергосетевого хозяйства на показатели качества электроэнергии и иных диагностически значимых параметров.

При осуществлении диагностического контроля за техническим состоянием оборудования необходимо исходить из принципов достоверности и проблемной ориентированности. Приоритетной формой диагностирования электросетевого хозяйства является диагностический мониторинг, с помощью которого следует осуществлять постоянное диагностирование текущего технического состояния электрооборудования, и, как следствие, это будет способствовать своевременному выявлению возникающих проблем. Далее будет необходимо указать возможные сроки простоя единицы оборудования, блока или объектов распределительного сетевого комплекса из-за их ремонта либо замены.

Целями программного комплекса диагностического мониторинга электросетевого хозяйства являются:

- предупреждение появления аварийных процессов из-за дефектов электрооборудования;
- предложение мер, которые исключают развитие дефектов, в частности, изменение режима работы электрооборудования или проведение ремонтных работ;
- прогнозирование сроков службы блоков или отдельных единиц оборудования;
- автоматизация процессов диагностики и принятия решения, что позволяет снизить человеческий фактор в процессах сбора, формирования и обработки результатов мониторинга;
- запись ретроспективных данных о техническом состоянии электрооборудования.

Для проведения мониторинга необходимо использовать на реконструируемых и строящихся объектах электросетевого хозяйства электрооборудование, которое может обеспечить возможность организации диагностики технического состояния в рабочем режиме без отключения оборудования. Применение системы автоматического мониторинга требует реализации функции удаленного доступа к оперативной информации о состоянии электрооборудования, для осуществления оперативного контроля диспетчером.

Оборудование, которое не оснащено системой автоматического диагностирования, должно проходить, согласно действующим программам, техническим заданиям, локальным нормативным актам и рекомендациям производителя электрооборудования, периодическое комплексное диагностирование технического состояния. В обязательном порядке таким проверкам должны подвергаться отработавшие нормативный срок службы, которым не продлен эксплуатационный ресурс, автотрансформаторы, силовые трансформаторы и шунтирующие реакторы.

В рабочем состоянии требуется обеспечение непрерывного контроля состояния таких параметров, как:

- сила тока, напряжение, активная и реактивная мощность, косинус  $\phi$  (коэффициент мощности) для входных и выходных параметров высокого, среднего или низкого напряжения электрического оборудования;
- влагосодержание трансформаторного масла;
- газосодержание трансформаторного масла;
- тангенсу дельта ( $\text{tg}\delta$ , тангенс угла диэлектрических потерь), емкости вводов высокого и низкого напряжения, являющихся показателями качества изоляции;
- уровень частичных разрядов для проверки изоляции электрооборудования;
- температура верхних слоев масла при входе в охладители и выходе из них;
- сила тока и напряжения в фазах трансформатора;
- температуры элементов системы охлаждения;
- изменение числа обмоток трансформатора, работающего под нагрузкой;
- наличие межвитковых замыканий в трансформаторах напряжения.

У ограничителей перенапряжения нелинейных контролируется несколько следующих параметров, которые отражают их состояние:

- срабатывание с сохранением диапазона тока, проходящего через ограничитель;
- полный ток утечки;
- первая, третья и пятая гармоники полного тока утечки;
- активная составляющая тока утечки;
- первая и третья гармоника активной составляющей тока утечки;
- реактивная составляющая тока утечки;
- температура.

Также требуется периодическое диагностирование следующих элементов опорной и подвесной изоляции:

- тепловизионное обследование опорно-стержневой фарфоровой и опорно-стержневой полимерной изоляции;
- оптический контроль или ультрафиолетовая диагностика опорно-стержневой фарфоровой и опорно-стержневой полимерной изоляции;
- звуковой контроль микротрещин в опорно-стержневой фарфоровой изоляции;
- ультразвуковой контроль микротрещин в опорно-стержневой фарфоровой изоляции.

Периодического контроля требуют закрытые шинопроводы и с литой изоляцией по таким параметрам, как:

- температура шинопровода;
- влажность;
- числа импульсов интенсивности частичных разрядов.

Периодический мониторинг шин, аппаратных зажимов, высокочастотных заградителей и контактных соединений производится оптическим и тепловизионным методами. Эксплуатируемые и вновь вводимые комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией необходимо оборудовать системами мониторинга рабочего состояния под напряжением. Вышеуказанная система автоматической диагностики комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией используется для сбора, отображения, обработки и хранения данных, характеризующих текущее состояние комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией.

Целями оснащения системами автоматической диагностики элегазовых комплектных распределительных устройств являются:

- поиск дефектов в изоляции на начальных стадиях их появления;
- повышение надежности электроснабжения благодаря своевременному предотвращению аварийных ситуаций;
- улучшение качества и эффективности ремонта элегазовых комплектных распределительных устройств на основании полученной диагностической информации;

- уменьшение затрат из-за исключения необоснованных ремонтов и простоев;
- получение оценки текущего состояния распределительных устройств и прогноза развития дефектов согласно информации по изменению параметров разрядных процессов в изоляции.

Таким образом, в основе традиционного подхода к оценке состояния основных видов электротехнического оборудования лежат несколько групп диагностических характеристик:

- контроль изоляционных характеристик электрооборудования, базирующийся на оценке изменений  $\tan\delta$  и емкости изоляции при испытательном напряжении 10 кВ и измерении сопротивления изоляции при напряжении 2,5 кВ. Такой подход был достаточно эффективным при контроле состояния изоляции маслонаполненного электрооборудования негерметичного исполнения, когда увлажнение изоляции происходило постепенно, а изоляция конструктивно имела достаточно большие запасы. Современное оборудование уже более 20 лет выполняется, как правило, в герметичном исполнении. Это позволило конструкторам оборудования существенно сократить запасы, что в свою очередь требует изменения подходов к принципам его диагностики;

- контроль общего состояния силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов с помощью хроматографического анализа растворенных в масле газов разработан и внедрен относительно недавно. Дает достаточно объективную информацию о состоянии оборудования. Осуществляется периодически (один раз в полгода). Имеются предложения по распространению данного метода контроля на все маслонаполненное оборудование;

- контроль технологических характеристик трансформаторного оборудования, таких как потери холостого хода и короткого замыкания. Данные измерения традиционно проводились при пониженном напряжении (380 В) и были необходимы для проверки исправности магнитопровода и определения геометрической целостности обмоток трансформатора. Точность таких измерений, при использовании существовавшей измерительной техники, была невелика, однако наличие таких измерений позволяло зафиксировать появление в процессе эксплуатации грубых дефектов. Появление необходимости стандартизации нормативов потерь в новых экономических условиях и необходимость защиты тарифов на передачу и распределение энергии требует создания методической и высокоточной аппаратной базы для контроля этих параметров под рабочим напряжением для реального отражения в отчетной и обосновывающей документации;

- контроль механических характеристик коммутационной аппаратуры в настоящее время осуществляется на отключенном оборудовании и проводится совместно с измерением сопротивления постоянному току. Это позволяет оценить состояние контактной системы выключателей и разъединителей и в какой-то степени приводных механизмов. Полное обследование состояния приводных механизмов проводится только в процессе ревизии, выполняемой после наработки определенного количества операций или времени работы. Необходимость плановых отключений для проведения таких работ вызывает определенные неудобства, так как нарушается стандартный технологический процесс передачи и распределения электроэнергии;

- контроль состояния конструкций кабельных и высоковольтных линий, линейной изоляции, проводов и тросов осуществляется путем низовых и верховых осмотров и периодическим измерением ряда параметров (сопротивление контура заземления, сопротивления фарфоровой изоляции и т. д.). При этом практически все процедуры контроля и измерений проводятся на отключенном оборудовании.

При обнаружении какого-либо несоответствия измеренных параметров требованиям нормативно-технической документации для уточнения состояния электрооборудования приглашаются специализированные организации, выполняющие более глубокие обследования и выдающие рекомендации по дальнейшей эксплуатации электрооборудования [5].

Итак, объединяя в единую систему диагностику электротехнического оборудования и мониторинг контроля качества электроэнергии, можно предполагать возникновение аварийной ситуации, и, соответственно, необходимость проведения ремонтных работ.

Для проведения вышеуказанного прогнозирования необходимо воспользоваться следующими формулами:



относительная вероятность аварии от  $i$ -го показателя качества электроэнергии равна:

$$A_{э_i} = K_{э_i} / K_{э_k}, \quad (1)$$

где  $K_{э_i}$  – это текущий  $i$ -й параметр уровня качества электроэнергии, значимый для данного оборудования (блока), превышающий порог возможности влияния данного показателя на возможность отказа оборудования (блока)  $K_{э_n}$ ;  $K_{э_k}$  – критическое значение  $i$ -го параметра уровня качества электроэнергии, влияющего на показатель отказоустойчивости, и зависящее от требования безотказной работы оборудования (определяется в процессах проведения эксплуатаций оборудования величиной для каждого параметра и каждой единицы оборудования).

Если сумма полученных относительных значений вероятности аварии каждого показателя на одной единице оборудования:

$$\Sigma A_{э} = A_{э_1} + A_{э_2} \dots A_{э_n} \geq 1 \times K_{а_3}, \quad (2)$$

где  $K_{а_3}$  – коэффициент запаса допустимой отказоустойчивости по параметрам электрического тока, определяемый для каждого типа оборудования (блока), который находится в пределах  $0,7 \dots 1$ , определяемый эксплуатантом системы в зависимости от требуемой надежности, то оборудование требует немедленного ремонта, так как подвергается угрозе создания аварийной ситуации. Чем меньше коэффициент запаса допустимой отказоустойчивости, тем более надежна система.

Если же сумма полученных относительных значений вероятности аварии каждого показателя на одной единице оборудования более нуля, но менее коэффициента запаса допустимой отказоустойчивости по параметрам электрического тока:

$$K_{за} \geq \Sigma A_{э} > 0, \quad (3)$$

то в данном случае необходим ремонт только при профилактических работах.

Для проведения прогнозирования по данным постоянного мониторинга, полученным по показателям, упомянутых в таблице 1, необходимо воспользоваться следующими формулами: относительная вероятность аварии от  $i$ -го показателя мониторинга:

$$A_{м_i} = K_{м_i} / K_{м_k}, \quad (4)$$

где  $K_{м_i}$  – это текущий  $i$ -й параметр состояния оборудования, значимый для данного оборудования (блока), превышающий порог возможности влияния данного показателя на возможность отказа оборудования (блока)  $K_{м_n}$ ;  $K_{м_k}$  – критическое значение  $i$ -го параметра состояния оборудования, влияющего на показатель отказоустойчивости, и зависящее от требования безотказной работы оборудования (определяется в процессах проведения эксплуатаций оборудования величиной для каждого параметра и каждой единицы оборудования).

Если сумма полученных относительных значений вероятности аварии каждого показателя на одной единице оборудования:

$$\Sigma A_{м} = A_{м_1} + A_{м_2} \dots A_{м_n} \geq 1 \times K_{м_3}, \quad (5)$$

где  $K_{м_3}$  – коэффициент запаса допустимой отказоустойчивости, определяемый для каждого типа оборудования (блока), который находится в пределах  $0,25 \dots 1$ , определяемый эксплуатантом системы в зависимости от требуемой надежности. Чем меньше коэффициент запаса допустимой отказоустойчивости, тем более надежна система.

Если же сумма полученных относительных значений вероятности аварии каждого показателя на одной единице оборудования более нуля, но менее коэффициента запаса допустимой отказоустойчивости по данным мониторинга:

$$K_{Ma} \geq \Sigma A_m > 0, \quad (6)$$

то в данном случае необходим ремонт только при профилактических работах.

По формулам (1)–(3) также возможно проводить автоматизированный анализ качества электрического тока. Однако в этом случае коэффициенты могут быть отличными от тех, которые применяются при определении суммы полученных относительных значений вероятности аварии, так как расчет по требованиям к качеству электрической энергии имеет смысл лишь в случае, если требования к показателям ее выше, чем характеристики качества электроэнергии влияют на отказоустойчивость оборудования. Например, коэффициент запаса качества электрического тока, определяемого для каждого типа оборудования (блока), будет находиться в пределах 0,1–0,7.

Суммы показателей относительной вероятности аварии по данным диагностики оборудования и по данным мониторинга параметров качества электрического тока не зависят друг от друга. В случае наличия отклонения в параметрах диагностики и по данным диагностики оборудования, а также согласно информации мониторинга параметров качества электрического тока, решение принимается согласно наибольшему значению одного из указанных показателей.

Данные мониторинга обновляются постоянно, в зависимости от времени проведения оценки того или иного параметра. Сигнал о необходимости проведения ремонтных работ сразу же поступает на пульт дежурному, когда тот или иной параметр оборудования становится выше критического.

Анализ возможности достижения критического уровня показателей диагностики осуществляется с помощью интерполяции данных за день, неделю и месяц в уравнение первого порядка. Вся информация об исходных данных и расчетных показателях записывается и при необходимости анализируется. Все пороговые и критические значения показателей и рекомендуемые коэффициенты для каждого типа оборудования будут предлагаться в файле справки. Ниже на рисунке 3 приведены результаты работы программы.

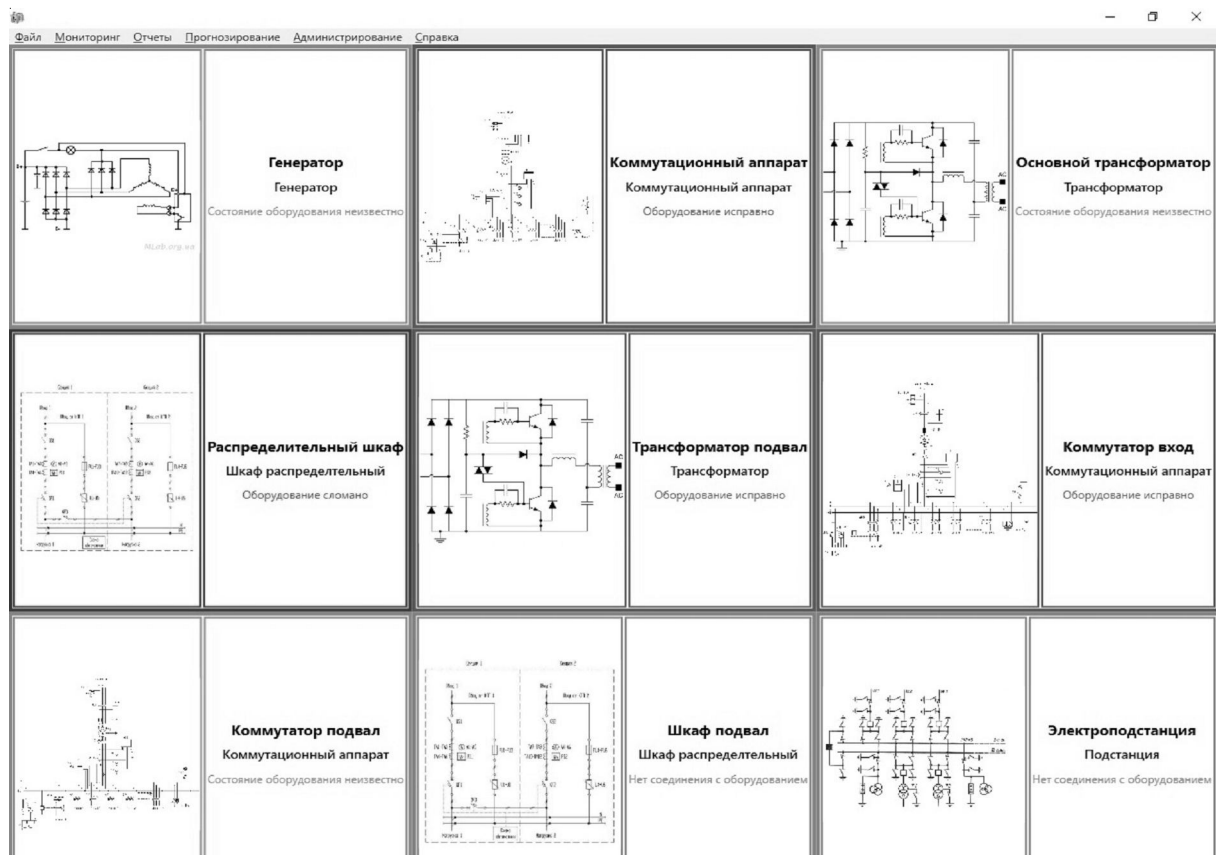


Рис. 3. Анализ работоспособности оборудования

Примечание. Составлено автором.

### Заключение

В результате проведенной работы были установлены основные параметры качества электрической энергии, а именно отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения, отклонение значения напряжения электропитания от номинального значения, кратковременная и длительная дозы фликера, коэффициент гармонических составляющих напряжения, до сорокового порядка, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и по нулевой последовательностям для трехфазной системы, прерывания и провалы напряжения, перенапряжения и импульсные напряжения, значения которых составят массивы входных данных базы данных по потерям электроэнергии в сетях среднего и низкого напряжения.

Рассмотрены и подобраны параметры электротехнического оборудования, а именно автотрансформаторов, силовых трансформаторов, масляных реакторов, трансформаторов тока, трансформаторов напряжения электромагнитных и емкостных, выключателей воздушных, масляных, электромагнитных и элегазовых, короткозамыкателей, отделителей, разъединителей, разрядников и ограничителей перенапряжений, вводов, воздушных линий электропередач, с помощью которых можно будет осуществлять мониторинг его состояния. Предложена система уравнений и показателей, позволяющая производить оценку качества и надежности работы всего оборудования и необходимость проведения ремонтных работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Стандартинформ, 2014. – III, 16 с.
2. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М. : Стандартинформ, 2014. – 52 с.
3. ГОСТ Р 51317.4.15-2012 (МЭК 61000-4-15:2010). Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования. – М. : Стандартинформ, 2014. – 32 с.
4. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. – М. : Стандартинформ, 2013. – 34 с.
5. Концепция диагностики электротехнического оборудования подстанций и линий электропередачи электрических сетей ОАО «ФСК ЕЭС». – М., 2005. – 187 с.
6. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: [http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ETP\\_FSK\\_EES\\_2014\\_02\\_06.pdf](http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ETP_FSK_EES_2014_02_06.pdf). – Загл. с экрана.
7. Паолетти, Дж. Мониторинг показателей отказов электротехнического оборудования и сведение плановых отключений к нулю: прошлое, настоящее и будущее методов технического обслуживания / Дж. Паолетти, Г. Херман // СФЕРА. Нефть и газ. – 2015. – № 3 (47). – С. 142–151.
8. Сахарова, И. В. Анализ количественной оценки надежности и качества электроснабжения потребителей в мировой и российской практике / И. В. Сахарова // Энергоназор. – 2014. – № 5 (57). – С. 22–24.
9. Сахарова, И. В. Об учете качества услуг в тарифном регулировании распределительных электросетевых компаний в российской и зарубежной практике / И. В. Сахарова // Современная экономика: проблемы и решения. – 2013. – № 5 (41). – С. 43–52.

### REFERENCES

1. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [GOST 32144-2013. Electrical Energy. Electro-Magnetic Compatibility of Technical Equipment. Quality Norms of Electric Energy in Power Supply Systems of General Purpose]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.

2. *GOST 30804.4.30-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniy pokazateley kachestva elektricheskoy energii* [GOST 30804.4.30-2013. Electrical Energy. Electro-Magnetic Compatibility of Technical Equipment. Methods of Measuring Quality Parameters of Electrical Energy]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 52 p.

3. *GOST R 51317.4.15-2012 (MEK 61000-4-15:2010). Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Flikermetr. Funktsionalnye i konstruktivnye trebovaniya* [GOST R 51317.4.15-2012 (MEK 61000-4-15:2010). Electro-Magnetic Compatibility of Technical Equipment. Flickermeter. Functional and Design Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 32 p.

4. *GOST 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Obshchee rukovodstvo po sredstvam izmereniy i izmereniyam garmonik i intergarmonik dlya sistem elektrosnabzheniya i podklyuchaemykh k nim tekhnicheskikh sredstv* [GOST 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). Electro-Magnetic Compatibility of Technical Equipment. General Guidance for Measuring Instruments and Measurement of Harmonics and Interharmonics for Power Supply Systems and Connected Technical Means]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 34 p.

5. *Kontseptsiya diagnostiki elektrotekhnicheskogo oborudovaniya podstantsiy i liniy elektroperedachi elektricheskikh setey OAO «FSK EES»* [The Conception of Diagnostics of the Electro-Technical Equipment of Substations and Transmission Lines Electrical Networks of FSK EES OJSC]. Moscow, 2005. 187 p.

6. *Polozhenie OAO «Rosseti» o edinoy tekhnicheskoy politike v elektrosetevom komplekse* [Provision of Rosset OJSC on the Uniform Technical Policy in an Electro-Network Complex]. URL: [http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/etp\\_fsk\\_ees\\_2014\\_02\\_06.pdf](http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/etp_fsk_ees_2014_02_06.pdf).

7. Paoletti D., Kherman G. Monitoring pokazateley otkazov elektrotekhnicheskogo oborudovaniya i svedenie planovykh otklyucheniy k nulyu: proshloe, nastoyashchee i budushchee metodov tekhnicheskogo obsluzhivaniya [Monitoring of Indicators of Electro-Technical Equipment Failures and Bringing Planned Shutdowns to Zero: the Past, the Present and the Future of Maintenance Methods]. *SFERA. Neft i gaz*, 2015, no. 3 (47), pp. 142-151.

8. Sakharova I.V. Analiz kolichestvennoy otsenki nadezhnosti i kachestva elektrosnabzheniya potrebiteley v mirovoy i rossiyskoy praktike [The Analysis of Quantitative Assessment of Reliability and Quality of Power Supply of Consumers in the World and Russian Practice]. *Energonadzor*, 2014, no. 5 (57), pp. 22-24.

9. Sakharova I.V. Ob uchete kachestva uslug v tarifnom regulirovanii raspredelitelnykh elektrosetevykh kompaniy v rossiyskoy i zarubezhnoy praktike [On the Accounting of Quality of Services in Tariff Regulation of Distributive Electro-Network Companies in Russian and Foreign Practice]. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya* [Modern Economy: Problems and Solutions], 2013, no. 5 (41), pp. 43-52.

## **SOFTWARE DEVELOPMENT TO ASSESS THE ECONOMIC EFFICIENCY OF OPERATION AND THE CONSEQUENCES OF UPGRADING THE EQUIPMENT OF ELECTRIC GRID COMPANIES**

**Irina Vitalievna Usacheva**

Candidate of Economic Sciences,  
Associate Professor, Department of Mathematical Methods and Computer Science in Economics,  
Volgograd State University  
Zeppelin89@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Anna Vyacheslavovna Volkova**

Senior Lecturer, Department of Mathematical Methods and Computer Science in Economics,  
Volgograd State University  
a.v.volkova@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The purpose of this work is to develop an automated system for making decisions on energy quality management, as well as diagnostics and management of electrical equipment. The creation of an intelligent automated system for managing the technical assets

of power enterprises in the current conditions of high wear and tear of electric grid equipment, taking into account the changed market conditions, is a very urgent task. The system is aimed at solving the problem of optimization of the company's network upgrade strategy, which at the current moment is quite acute for the owners of electric grid companies due to the high degree of equipment wear and significant losses of electricity in the medium and low voltage networks during its transmission. The solution of this scientific and technical task will significantly reduce the company's financial costs when upgrading the power grid equipment, make the renewal process of fixed assets more transparent and financially efficient. The effect from the implementation of this task will allow us to obtain sufficiently reliable information for the management of technical assets on the basis of any aggregated accessible information, regardless of the type of information, and to optimize financial losses in the modernization of power grid equipment, and as a result, to increase the company's flexibility in tariff formation effect for energy-intensive business in general. The theoretical research in the field of parameters of quality of electric energy and reliability of the equipment, in particular dependence of productivity and safety of the equipment, including electric equipment, on parameters of quality of the electric power, are carried out. The methods of their calculation are shown, and a list of parameters is given that will be used to create data sets in the software product, through which it will be possible to monitor the equipment and make a decision on carrying out repair work.

**Key words:** reliability and quality of electricity, electrical networks, electricity, data sets, a system for diagnosing electrical equipment.