

УДК 622.23.08

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

**В. Н. ГАЛУШКО**

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель*

**Т. В. АЛФЕРОВА, А. А. АЛФЕРОВ, С. И. БАХУР**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Для обеспечения безопасной и эффективной работы в режимах эксплуатации и ремонта электрооборудования необходимо знать фактический уровень его надежности с учетом воздействия реальных эксплуатационных факторов [1]. Поэтому *актуальной* задачей является разработка методов и математических моделей количественной оценки показателей эксплуатационной надежности и эффективности работы электрооборудования, позволяющих учесть основные влияющие факторы.

Целью данной работы является создание программно-статистического инструментария для уменьшения последствий колебаний, несимметрии напряжения, отклонения частоты в электрической сети, повышения надежности электрических объектов и систем; развития теории и совершенствования методов расчета показателей эксплуатационной надежности электрооборудования с учетом условий и режимов работы.

### **Основная часть**

Применение программных пакетов электрического моделирования (Multisim, Orcad, Simulink) всех элементов систем электроснабжения по отдельности и в комплексе осуществляется с целью проверки существующих результатов энергопотребления и прогнозирования изменения электропотребления при проведении энергоаудита по предложенным мероприятиям. По результатам моделирования электрических систем цехов и целых предприятий создана библиотека шаблонов, с помощью которой исследователю не требуется заново создавать рабочий прототип, а лишь составить свою схему. На данном этапе проводились приборные эксперименты по анализу влияния различных факторов (отклонения напряжения и частоты) на электропотребление (активная и реактивная мощности, гармонический состав тока и т. д.) для используемого и нового оборудования, рекомендованного при проведении энергоаудита на предприятиях машиностроения. Современные программные пакеты электрического моделирования позволяют значительно экономить время на аналитических расчетах, создавать библиотеки баз данных, программировать отказы элементов, подбирать рабочие прототипы схем с рабочими параметрами с помощью встроенного отладчика ошибок моделирования, указывать в модели элементы схем, не подходящие по напряжению и току, использовать реальные и виртуальные элементы с заданными характеристиками, применять большое число виртуальных приборов, часто недоступ-

ных на практике (цифровой запоминающий осциллограф, плоттер Боде, частотомер, логический анализатор, измеритель нелинейных искажений, приборы LabVIEW), дают возможность разработки новых библиотек элементов на языках VHDL и SPICE, а также возможность объединения в пакет различных анализов или образцов одного и того же анализа для последовательного выполнения операций и т. д.

Схема этапов математического моделирования представлена на рис. 1.

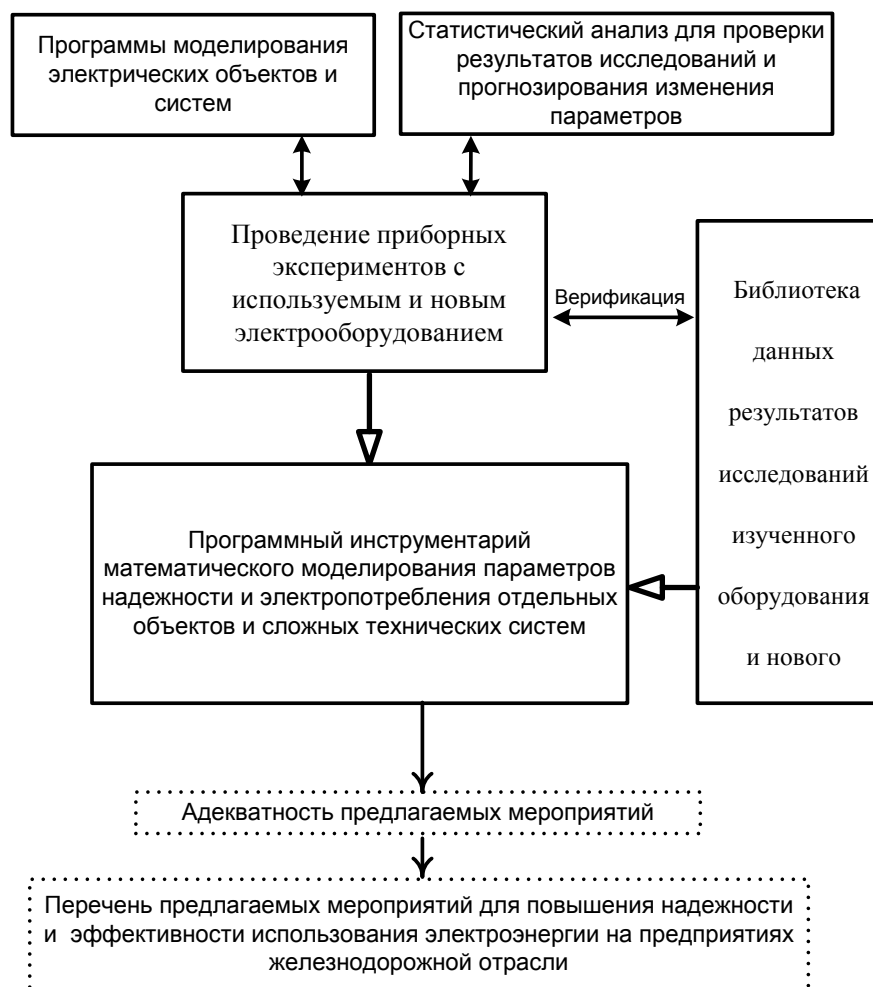


Рис. 1. Схема этапов математического моделирования

Применение моделирования электрических систем позволяет не только установить условия работы электрооборудования, но и выявить причины, вызвавшие их отклонения.

Неблагоприятное влияние на питающую сеть оказывают, например, дуговые печи, которые могут иметь мощность до 10 МВт, сооружаемые как однофазные. Это приводит к нарушению симметрии токов и напряжений. Кроме того, дуговые печи, как и вентильные установки, являются нелинейными электроприемниками (ЭП) с малой инерционностью. Поэтому они приводят к несинусоидальности токов, а следовательно, и напряжений. Электросварочные установки могут являться причиной нарушения нормальных условий работы для других ЭП. В частности, сварочные агрегаты, единичная мощность которых достигает 1500 кВт, вызывают значительно большие колебания напряжения в электрических сетях, чем, например, пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Кроме того, эти колебания напряжения происходят

длительно и с широким диапазоном частот, в том числе и в самом неприятном для установок электрического освещения диапазоне (около 10 Гц) [2], [3].

Пример реализации части электрической схемы с помощью программного пакета Multisim представлен на рис. 2.

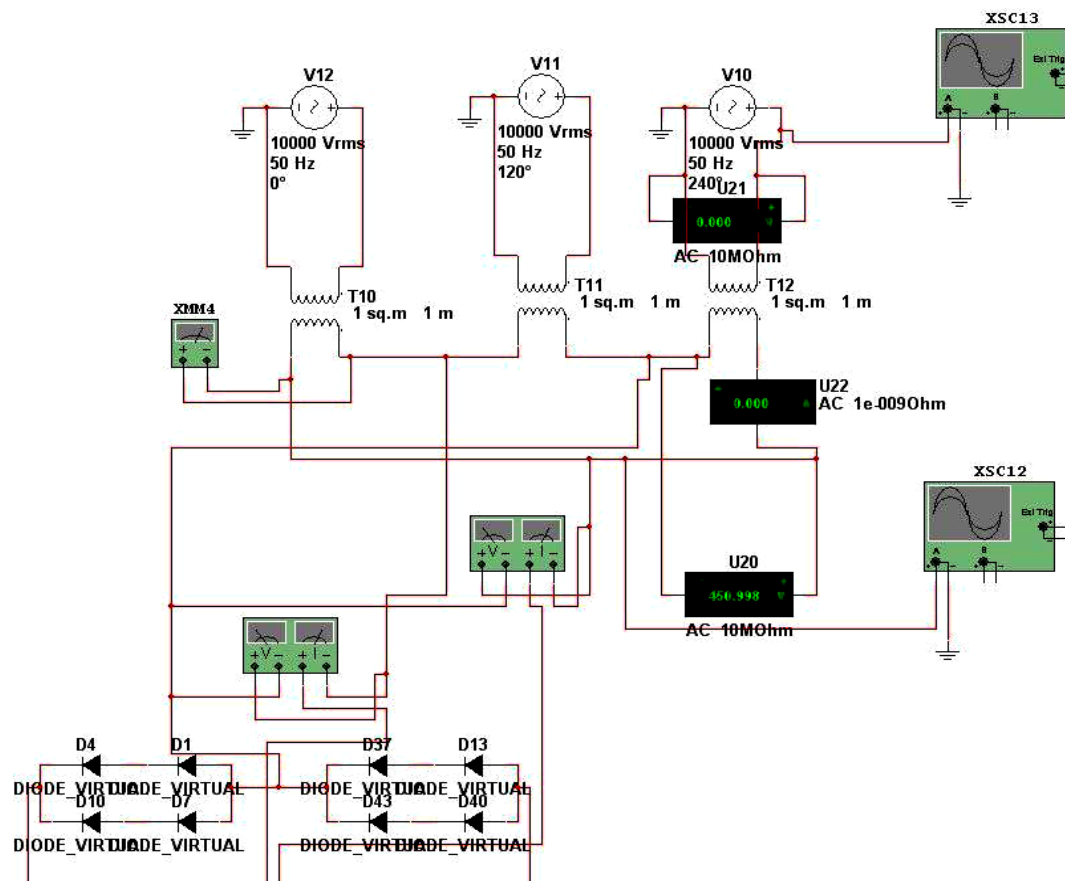


Рис. 2. Пример реализации части электрической цепи в Multisim10

Основная задача статистического анализа – создание эффективного инструментария оценки параметров надежности и электропотребления отдельных объектов и сложных технических систем. За основу приняты такие программы, как MS Excel, Statgraphics, Statistica, SPSS.

Рассмотрим некоторые виды задач многомерного статистического анализа, которые могут возникнуть при изучении сложных *многофакторных систем*:

- 1) существует ли связь между отдельными факторами;
- 2) если между какими-то факторами есть связь, то насколько она тесная;
- 3) если между какими-то факторами есть связь, то какой функцией ее представить;
- 4) какие входные факторы оказывают на определенные выходные наибольшее влияние;
- 5) какие входные факторы можно отбросить из процесса изучения на основании их слабого, сравнимого с шумом, влияния;
- 6) существуют ли неучтенные факторы, которые необходимо рассматривать ввиду их существенного влияния на выходные;
- 7) существуют ли обобщенные факторы, которыми можно заменить рассматриваемые;

8) как связаны между собой зашумленные факторы и каковы характеристики шума;

9) как выделить «полезную» информацию из зашумленной.

Все эти задачи можно решить с помощью методов многомерного статистического анализа, включающего в себя следующие анализы: корреляционный, регрессионный, конъюэнтный, дисперсионный, факторный, теорию фильтрации.

Каждый из этих разделов – совокупность методов и приемов математической статистики. Выбор методов диктуется лишь конкретной практической задачей. Так, задачи 1, 2 вышеприведенного списка решаются методами корреляционного анализа, задача 3 – регрессионного анализа. Задачи 4–6 относятся к задачам дисперсионного анализа, 7 – факторного, а 8 – конъюэнтного. Теория фильтрации позволяет решить задачу 9.

В зависимости от информационной составляющей исследуемого объекта и возможности проведения статистических испытаний рассмотрены разные подходы по определению параметров надежности.

Структура программного инструментария включает в себя следующие элементы: шаблон исходных данных элементов исследуемого объекта и библиотеку реализованных элементов (bibl. elementov); шаблон данных параметров моделирования в виде номинальных величин и отклонений от них (parametr. modelirov); дерево возможных связей между элементами; шаблон влияния различных факторов в виде процедуры аналитической зависимости для каждого элемента системы между показателями надежности и параметрами моделирования.

Результаты представляются в графическом или аналитическом виде.

Этап приборных экспериментов включает подбор соответствующего оборудования и методик испытаний. В перечень средств измерений входят: анализаторы качества электроэнергии, люксметры, тепловизоры, измерители плотности тепловых потоков, газоанализаторы и другие приборы.

Библиотека данных по результатам накопленных сведений и проводимых исследований включает результаты исследований применяемого и нового оборудования. Ниже приводятся некоторые положения, составляющие часть информации математической модели параметров надежности и электропотребления отдельных объектов и сложных технических систем.

Влияние отклонений напряжения в электрической сети приводят к следующим последствиям:

- колебаниям светового потока осветительных приборов (фликер-эффект);
- ухудшению качества работы телевизионных приемников;
- нарушению в работе рентгеновского оборудования;
- ложной работе регулирующих устройств и ЭВМ;
- нарушениям в работе преобразователей;
- колебаниям момента на валу вращающихся машин, вызывающим дополнительные потери электроэнергии и увеличенный износ оборудования, а также нарушения технологических процессов, требующих стабильной скорости вращения.

При отклонении напряжения в положительную сторону расход энергии увеличивается, сокращаются сроки службы оборудования, особенно ламп накаливания. В Украине, по данным Института электродинамики НАН Украины, снижение качества электроэнергии увеличивает ее расход на 10–12 % [4].

Люминесцентные лампы менее чувствительны к отклонениям напряжения. При отклонениях напряжения на 10 % срок службы люминесцентных ламп в среднем снижается на 20–25 %. Существенным недостатком люминесцентных ламп является

потребление ими реактивной мощности, которая растет с увеличением подводимого к ним напряжения.

При снижении напряжения уменьшается вращающий момент и частота вращения ротора асинхронного двигателя. Если производительность механизмов зависит от частоты вращения двигателя, то рекомендуется поддерживать напряжение не ниже номинального. При значительном снижении напряжения на выводах двигателей, работающих с полной нагрузкой, момент сопротивления механизма может превысить вращающий момент, что приводит к «опрокидыванию» двигателя, т. е. к его остановке. В случае снижения напряжения на зажимах двигателя реактивная мощность намагничивания уменьшается (на 2–3 % при снижении напряжения на 1 %), при той же потребляемой мощности увеличивается ток двигателя, что вызывает перегрев изоляции [5].

Резкие колебания напряжения отрицательно сказываются на динамике ведения поездов. Скачки тока и тягового усилия, вызываемые колебаниями напряжения, снижают надежность работы контакторов и опасны с точки зрения возникновения буксования. Для электроподвижного состава опасны колебания порядка 4–5 %.

Электросварочные установки переменного тока дуговой и контактной сварки представляют собой однофазную неравномерную и несинусоидальную нагрузку с низким коэффициентом мощности: 0,3 – для дуговой сварки и 0,7 – для контактной. При снижении напряжения до  $0,9 U_{\text{ном}}$  время сварки увеличивается на 20 %, а при выходе его за пределы  $(0,9-1,1) U_{\text{ном}}$  возникает брак сварных швов. Отклонения напряжения отрицательно влияют на работу электросварочных машин: например, для машин точечной сварки при изменении напряжения на 15 % получается 100%-й брак продукции.

Колебания напряжения более 10 % могут привести к погасанию газоразрядных ламп. Зажигание их в зависимости от типа ламп происходит через несколько секунд или даже минут. При глубоких колебаниях напряжения (более 15 %) могут отпасть контакты магнитных пускателей, вызвав нарушения технологии производства.

Колебания напряжения с размахом 10–15 % могут привести к выходу из строя конденсаторов, а также вентильных выпрямительных агрегатов.

Электрические печи чувствительны к отклонениям напряжения. Понижение напряжения электродуговых печей, например на 7 %, приводит к удлинению процесса плавки стали в 1,5 раза. Повышение напряжения выше 5 % приводит к перерасходу электроэнергии.

**Влияние несимметрии напряжений на работу электрооборудования.** При несимметрии напряжений в 2 % сроки службы асинхронных двигателей сокращаются на 10,8 %, синхронных – на 16,2 %; трансформаторов – на 4 %; конденсаторов – на 20 %. Срок службы полностью загруженного двигателя, работающего при несимметрии напряжения 4 %, сокращается в 2 раза. При несимметрии напряжения 5 % располагаемая мощность асинхронного двигателя уменьшается на 5–10 % [3]. Скорость вращения асинхронных двигателей несколько снижается, возрастают вибрация вала и шум.

Несимметрия напряжения значительно ухудшает режимы работы многофазных вентильных выпрямителей: значительно увеличивается пульсация выпрямленного напряжения, ухудшаются условия работы системы импульсно-фазового управления тиристорных преобразователей.

Конденсаторные установки при несимметрии напряжений неравномерно загружаются реактивной мощностью по фазам, что делает невозможным полное использование установленной конденсаторной мощности. Кроме того, в этом случае усиливается уже существующая несимметрия, так как выдача реактивной мощности в сеть

в фазе с наименьшим напряжением будет меньше, чем в остальных фазах (пропорционально квадрату напряжения на конденсаторной установке).

**Влияние несинусоидальности напряжения.** Наиболее серьезные нарушения имеют место в работе мощных управляемых вентильных преобразователей. Токи 3-й и 5-й гармоник газоразрядных ламп составляют 10 и 3 % от тока 1-й гармоники. Эти токи совпадают по фазе в соответствующих линейных проводах сети и, складываясь в нулевом проводе сети 380/220 В, обуславливают в нем ток, почти равный току в фазном проводе.

Высшие гармоники тока и напряжения вызывают дополнительные потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения: в линиях электропередачи, трансформаторах, электрических машинах, статических конденсаторах, так как сопротивления этих элементов зависят от частоты. Так, например, емкостное сопротивление конденсаторов, устанавливаемых в целях компенсации реактивной мощности, с повышением частоты подводимого напряжения уменьшается. Поэтому если в напряжении питающей сети есть высшие гармоники, то сопротивление конденсаторов на этих гармониках оказывается значительно ниже, чем на частоте 50 Гц. Из-за этого в конденсаторах, предназначенных для компенсации реактивной мощности, даже небольшие напряжения высших гармоник могут вызвать значительные токи гармоник. На предприятиях с большим удельным весом нелинейных нагрузок батареи конденсаторов работают плохо. Они или отключаются защитой от перегрузки по току или за короткий срок выходят из строя из-за вспучивания банок (или ускоренного старения изоляции).

**Влияние отклонения частоты в энергосистеме на работу электроприемников.** Различают электромагнитное и технологическое влияние отклонения частоты на работу электроприемников. Электромагнитная составляющая обуславливается увеличением потерь активной мощности и ростом потребления активной и реактивной мощностей. Можно считать, что снижение частоты на 1 % увеличивает потери в сетях на 2 %.

Анализ работы предприятий с непрерывным циклом производства показал, что большинство основных технологических линий оборудовано механизмами с постоянным и вентиляторным моментами сопротивлений, а их приводами служат асинхронные двигатели. Частота вращения роторов двигателей пропорциональна изменению частоты сети, а производительность технологических линий зависит от частоты вращения двигателя.

Пониженная частота в электрической сети влияет на срок службы оборудования, содержащего элементы со сталью (электродвигатели, трансформаторы), за счет увеличения тока намагничивания в таких аппаратах и дополнительного нагрева стальных элементов.

Применительно к контактной сети для предприятий железнодорожной отрасли срок службы контактного провода в годах определяют по формуле

$$t_k = \frac{\Delta S_{\text{см}} n \cdot 10^{-4}}{i P_{\text{год}}},$$

где  $\Delta S_{\text{см}}$  – средний износ (потеря сечения) контактного провода к моменту его смены, мм<sup>2</sup>;  $n$  – число контактных проводов в подвеске;  $P_{\text{год}}$  – число проходов по участку единиц подвижного состава за год;  $i$  – удельный износ контактного провода, мм<sup>2</sup>/10 тыс. проходов электроподвижного состава.

Работники локомотивного хозяйства и электрификации могут эффективно влиять на величину  $i$  посредством применения прогрессивных токосъемных материалов, дополнительной смазки провода, выбора рационального числа рабочих токоприемников на электроподвижном составе и т. д. От них напрямую зависит величина  $\Delta S_{\text{см}}$ . Этот показатель на многих участках не достигает нормативных величин из-за повышенной неравномерности износа.

#### **Основные составляющие износа**

Абразивное изнашивание происходит из-за попадания между трущимися поверхностями продуктов износа, внешней пыли и наличия твердых включений в основном материале. В зависимости от свойств самого абразива изнашивание может быть очень тонким, близким к полированию, или весьма грубым, с образованием глубоких борозд.

Усталостное изнашивание связано с объемным деформированием трущихся поверхностей и растрескиванием перенаклепанного слоя материала с последующим его удалением. Износ при этом бывает достаточно высоким.

*Изнашивание в жестких точках.* В первую очередь имеются в виду фиксаторы, питающие зажимы электрических соединений, стыковые, средних анкеровок. Проход токоприемника по таким точкам нередко сопровождается значительным изменением контактного нажатия, иногда – отрывами от провода и искрением.

Стыковые зажимы обладают значительной сосредоточенной массой, из-за чего под ними износ контактного провода, как правило, увеличенный.

Повышенный износ у питающих зажимов наблюдается в том случае, если электрические поперечные соединения выполнены не гибким проводом, а обычным проволочным, а также если не предусмотрены специальные витки, уменьшающие жесткость контактной подвески в месте установки соединителя.

*Износ на сопряжениях анкерных участков, воздушных промежутках, стрелках.* Наиболее эффективны схемные решения, снижающие вероятность возникновения мощной дуги на разделе питания или делающие невозможным само появление дуги.

*Волнообразный износ.* Главной причиной возникновения волнообразного износа на участках переменного тока являлось прикосновение к проводу в какой-то момент времени не контактных пластин, а плохо проводящей сухой графитовой смазки. При этом съем тока пластинами осуществляется через электрическую дугу с образованием первых двух «волн». Последующие проходы ползцов (в одну или обе стороны) «растягивают» это явление и усиливают износ там, где он возник. Далее становится неважным, какова поверхность ползца, так как уже нарушена поверхность провода.

Причину возникновения волнообразного износа объясняют высокочастотными колебаниями провода, возбуждаемыми силой трения по нему вставок, возникновением стоячих волн и ритмическими отрывами вставок от провода, находящегося в таком состоянии. Поэтому такой износ может быть при любых контактных материалах, если динамические характеристики контактной подвески и токоприемников не соответствуют друг другу.

#### **Пережоги контактного провода**

Нагрев контактного провода в месте соприкосновения с ползцом токоприемника зависит от следующих факторов: характера контакта (дуговой или бездуговой; неподвижный или перемещающийся); состояния контактных поверхностей (степени загрязнения) и давления токоприемника; материала контактов (контактного сопротивления); величины и времени прохождения тока; схемы питания (односторонняя и двусторонняя); износа контактного провода и величины натяжения.

*Контроль и прогнозирование износа контактного провода.* Измерения износа контактного провода проводят, во-первых, для предупреждения опасного уменьшения его сечения, и во-вторых, для анализа характера и особенностей процесса изнашивания, изучения влияния отдельных факторов, определяющих срок службы провода, для планирования потребности в проводе и для разработки экономичных способов сокращения этой потребности.

По мнению специалистов, износ пластин полозов токоприемника и контактного провода состоит из трех основных составляющих:

$$W = W_1 + W_2 + W_3,$$

где  $W_1$  – механический износ;  $W_2$  – электрический износ от испарения, разбрызгивания материала под воздействием электрических дуг:  $W_2 = AI^n t$ ;  $A$  – коэффициент, зависящий от материалов пластин в условиях контактирования;  $I$  – сила электрического тока;  $t$  – время воздействия дуги;  $n$  – коэффициент, зависящий от материала пластин;  $W_3$  – механический износ от повреждений материала электрическими дугами.

Другой путь моделирования износа контактных проводов – вероятностный подход. Такая модель учитывает неслучайные и случайные приращения среднего износа по анкерному участку и функции числа прохода токоприемников.

Вид модели износа определяется целью проводимых исследований. Все существующие модели износа можно разбить на классы: адаптивные и имеющие жесткую структуру. Адаптивные модели устанавливают связь износа с доминирующим фактором и требуют уточнения параметров на основе конкретных местных условий. Основная часть участков электрифицирована относительно давно, и, проводя ретроспективный анализ износа, можно установить параметры модели. Для других случаев, когда размеры движения и веса поездов резко меняются, прогноз можно осуществлять по наихудшему варианту. Однако уже через год работы контактных проводов в новых условиях можно провести измерение износа и уточнить параметры модели. Для вновь электрифицированных участков ретроспективный анализ износа невозможен.

Все существующие модели описывают процесс износа по единственному его параметру – среднему значению. Их цель – прогнозирование среднего износа, причем механического, на анкерном участке для принятия решения о замене провода.

#### **Способы уменьшения интенсивности износа проводника**

Прежде всего необходимо проанализировать схемы питания и секционирования контактной сети каждого отдельного участка, установить места с наибольшей вероятностью отказов, в противном случае будет перерасход средств на содержание дополнительного эксплуатационного штата.

Постоянный контроль за состоянием объектов токосъема при помощи специальных диагностических средств позволит определить интенсивность отказов и выявить их закономерности в зависимости от условий работы контактной подвески.

В случае выявления участков контактного провода со степенью потери прочности, при которой дальнейшая эксплуатация с проектным значением натяжения нецелесообразна, рекомендуется изменять натяжение в соответствии с предлагаемыми методиками регулировки натяжения по значениям поверхностной твердости или коэффициентов ослабления ультразвуковых сигналов.

Опыт эксплуатации показывает, что тяговая нагрузка распределяется крайне неравномерно. Участки контактного провода на подъемах подвергаются более интенсивному износу, чем на спусках или площадках.



Нагрев контактного провода может быть вызван как рабочими токами, так и током короткого замыкания. На переменном токе нагрузка меньше, чем на постоянном, однако на единицу площади сечения приходится приблизительно одинаковая плотность тока. Поэтому целесообразно учитывать влияние величины рабочих токов на процесс старения материала провода. Чем выше плотность тока, тем интенсивнее износ провода.

Анализ динамики теплового износа контактного провода позволяет выявлять неблагоприятные режимы работы контактной сети, не связанные с качеством токосяема (уровнительные токи, неправильно выбранные уставки релейной защиты, срабатывание автоматического повторного включения на коротких фидерных зонах). По динамике роста теплового износа можно сделать прогноз о времени и затратах на усиление контактной подвески или смене провода для своевременного предотвращения обрыва контактного провода.

При отжиге контактного провода нецелесообразно эксплуатировать контактную подвеску с проектным значением натяжения. Установлено, что совместное действие натяжения и электрического тока приводит к более интенсивному разупрочнению, чем воздействие только электрического тока. Это связано с процессом ползучести в материале проводника, который является частным режимом пластического деформирования, катализатором рекристаллизации при нагреве проводника.

Исследования показали возможность дальнейшей эксплуатации контактного провода с натяжением, несколько отличающимся от проектных норм. Это дало возможность выработать методику по регулировке натяжения проводов в зависимости от степени их отжига.

В основу методики положено сравнение допустимых натяжений при определенном значении механического износа (согласно ПУТЭКС) с поверхностной твердостью, указывающей на степень теплового износа контактного провода.

Необходимо отметить, что в ряде случаев можно не достигнуть ожидаемого результата уменьшения интенсивности процесса разупрочнения провода, так как на его разупрочнение оказывает влияние множество факторов (качество изготовления проводов, настройка релейной защиты, выравнивание нагрузки фидеров контактной сети, усиление подвески), степень влияния которых различна. Поэтому необходимо проведение контроля износа провода после регулировки его натяжения.

### **Заключение**

Практическое применение результатов исследования заключается в создании обоснованных предпосылок определения основных показателей надежности и потребляемой электроэнергии электрических систем при воздействии различных факторов. Полученные результаты позволяют: прогнозировать показатели надежности электрооборудования в зависимости от условий эксплуатации; оценить степень опасности и установить «узкие места» электрических систем; разработать мероприятия по повышению эффективности функционирования электрооборудования.

### **Литература**

1. Назарычев, А. Н. Технология организации комплексной системы эксплуатации и ремонта электрооборудования по техническому состоянию / А. Н. Назарычев, Д. А. Андреев // Методы и средства оценки состояния энергет. оборудования ; ПЭИПК. – Иваново, 2004. – Вып. 24. – С. 15–24.
2. Оболенцев, Ю. Б. Электрическое освещение общепромышленных помещений / Ю. Б. Оболенцев, Э. Л. Гиндин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.

3. Шидловский, А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. – Киев : Навук. думка, 2005. – 209 с.
4. Сапрыка, А. В. Влияние низкого качества электроэнергии в сетях наружного освещения на энергоэффективность ламп высокого давления / А. В. Сапрыка // Вестн. ХНАДУ. – 2007. – № 37.
5. Головкин, П. И. Энергосистема и потребители электрической энергии / П. И. Головкин. – М. : Энергия, 1979.

*Получено 05.09.2014 г.*