

УДК 622.23.08

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

С.Ф. Маслович¹, В.Н. Галушко², С.В. Бахур³

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

³Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

MATHEMATICAL SIMULATION PARAMETERS OF RELIABILITY AND ENERGY CONSUMPTION

S.F. Maslovich¹, V.N. Halushko², S.V. Bakhur³

¹F. Scorina Gomel State University, Gomel, Belarus

²Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

³P.O. Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Belarus

Рассматривается идея создания программно-статистического инструментария, с помощью которого можно моделировать, анализировать и принимать решения по уменьшению последствий колебаний, несимметрии напряжения, отклонений частоты в электрической сети, повышению надежности электрических объектов и систем.

Ключевые слова: математическое моделирование, надежность, электропотребление, электрооборудование, электрическая схема.

The idea of creating software and statistical tools, with which you can simulate, analyze and take decisions to reduce the impact vibrations, voltage unbalance, frequency deviations in the electrical network and higher reliability of electric facilities and systems is considered.

Keywords: mathematical simulation, reliability, power consumption, electrics, electrical schema.

Введение

Для обеспечения безопасной и эффективной работы в режимах эксплуатации и ремонта электрооборудования необходимо знать фактический уровень надежности электрооборудования 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. Развитие теории и совершенствование методов расчета показателей эксплуатационной надежности электрооборудования с учетом условий и режимов работы.

1 Математическое моделирование эксплуатационной надежности и эффективности работы электрооборудования

Схема этапов математического моделирования представлена на рисунке 1.1.

Применение программных пакетов электрического моделирования (*Multisim*, *OrCad*, *Simulink*)

всех элементов систем электроснабжения по отдельности и в комплексе 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 которых 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 подходящих по напряжению и току, использовать реальные и виртуальные элементы с заданными характеристиками, применять большое число виртуальных приборов, часто

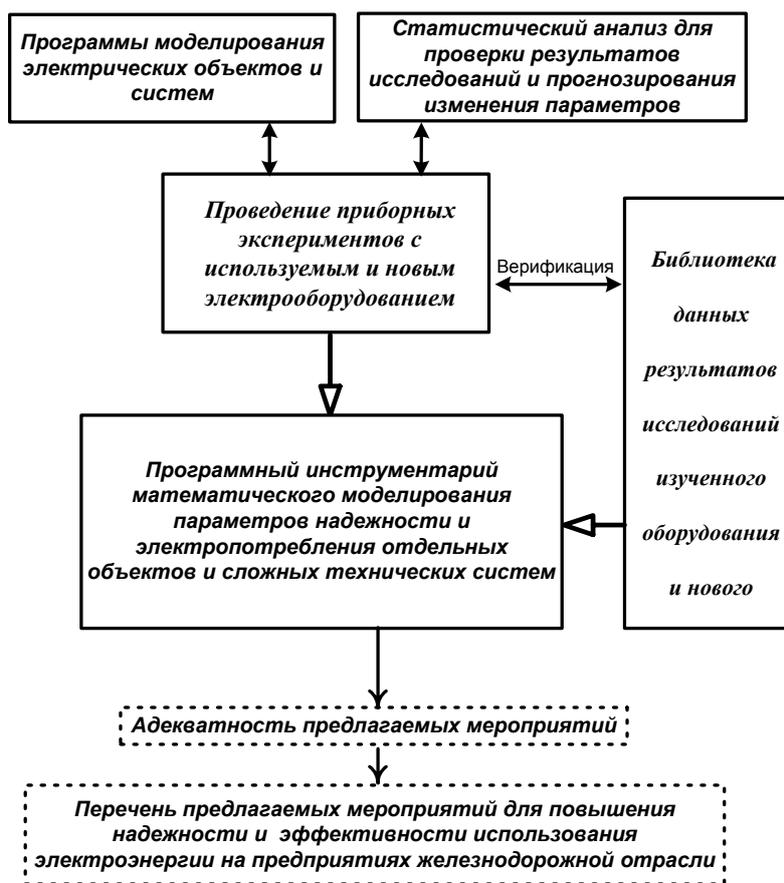


Рисунок 1.1 – Схема этапов математического моделирования

недоступных 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, возможность объединения в пакет различных анализов или образцов одного и того же анализа для последовательного выполнения и т. д.

2 Примеры реализации моделирования электрических систем

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

Например, неблагоприятное влияние на питающую сеть оказывают дуговые печи, которые могут иметь мощность до 10 МВт и сооружаются как однофазные. Это приводит к нарушению симметрии токов и напряжений. Кроме того, дуговые печи, как и вентиляльные установки, являются нелинейными 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, мощность которых достигает 1500 кВт в единице, 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 (порядка 10 Гц) [2], [3].

Пример реализации части электрической схемы с помощью программного пакета Multisim представлен на рисунке 2.1.

3 Задачи статистического анализа, при изучении сложных многофакторных систем

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.

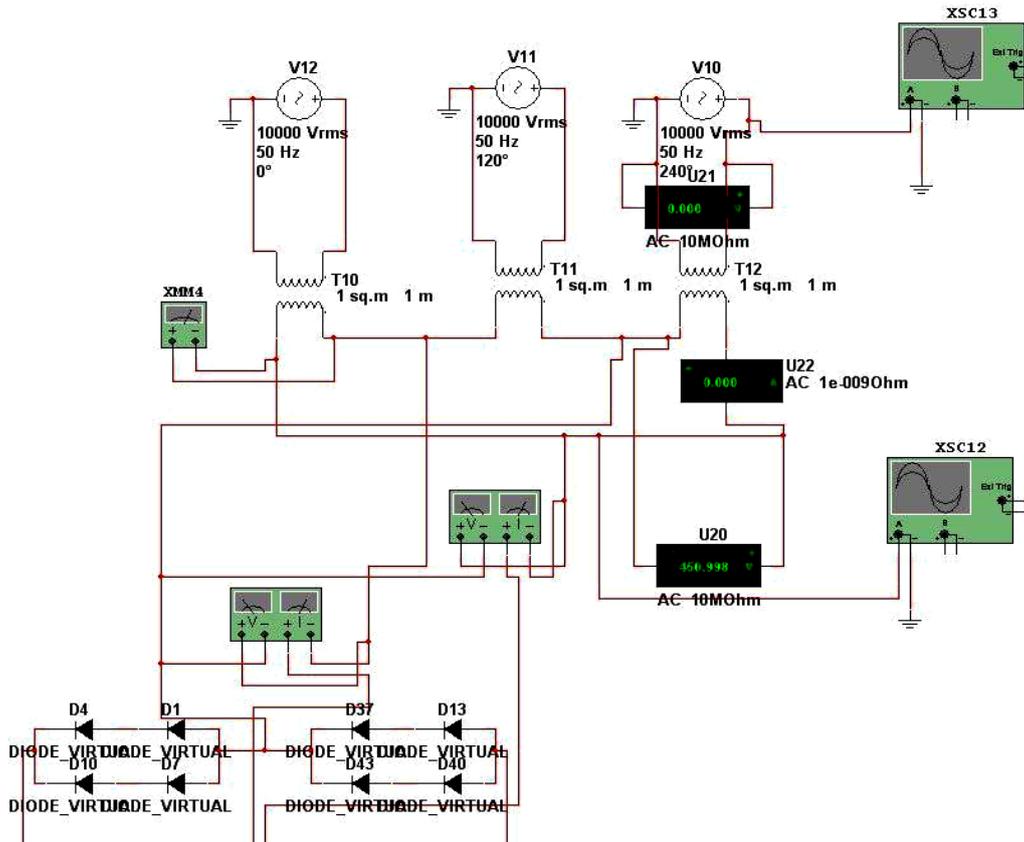


Рисунок 2.1 – Пример реализации части электрической цепи в Multisim10

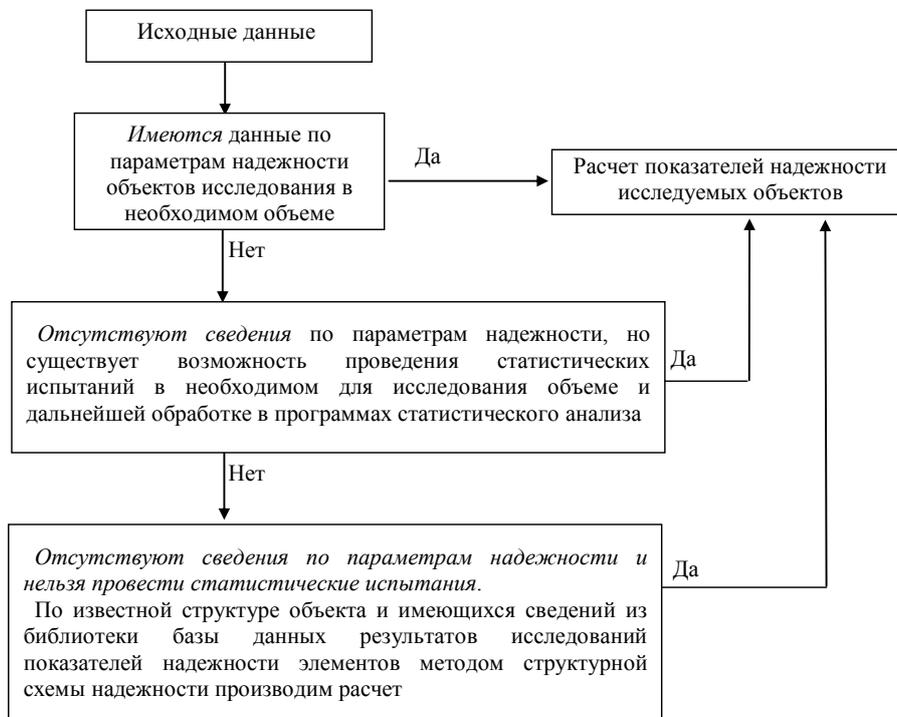


Рисунок 3.1 – Алгоритм определения показателей надежности объектов в зависимости от информационной базы данных

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, конъюнктный, дисперсионный, факторный, теорию фильтрации.

Каждый из этих разделов – совокупность методов и приемов математической статистики. Выбор методов диктуется лишь конкретной практической задачей. Так, например, задачи 1, 2 вышеприведенного списка решаются методами корреляционного анализа, задача типа 3 – регрессионного анализа. Задачи 4, 5, 6 относятся к задачам дисперсионного анализа, 7 – факторного, а 8 – конъюнктного. Теория фильтрации позволяет решить задачи типа 9.

В зависимости от информационной составляющей исследуемого объекта и возможности проведения статистических испытаний выполнены разные подходы по определению параметров надежности (рисунок 3.1).

4 Структура программного инструментария

Структура программного инструментария включает в себя следующие элементы: шаблон исходных данных элементов исследуемого объекта и библиотека 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. В качестве примера результатов можно привести часто используемую в других источниках [2], [3] зависимость характеристик ламп накаливания от напряжения,

но выполняемую применительно к современным источникам света.

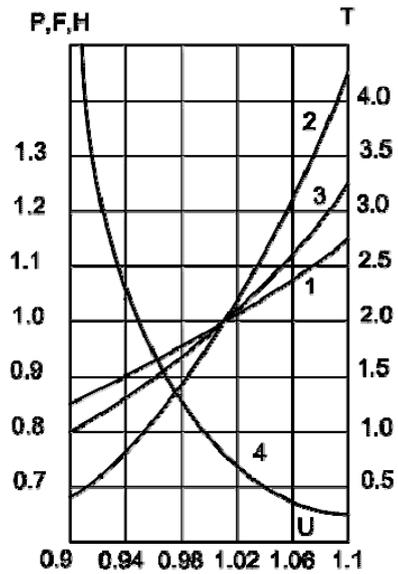


Рисунок 4.1 – Зависимости характеристик ламп накаливания от напряжения: 1 – потребляемая мощность, 2 – световой поток, 3 – световая отдача, 4 – срок службы

Например, срок службы изоляции T асинхронного двигателя при длительной работе и пониженном напряжении определяется по формуле:

$$T = \frac{T_{ном}}{R},$$

где $T_{ном}$ – срок службы изоляции двигателя при номинальном напряжении и номинальной нагрузке; R – коэффициент, зависящий от значения и знака отклонения напряжения, а также от коэффициента загрузки двигателя и равный:

$$R = \beta_1 \delta U^2 - \beta_2 \delta U^2 + 1.$$

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.

5 Положения для математических моделей параметров надежности и электропотребления отдельных объектов и сложных технических систем

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 электро-сварочных машин: например, для машин точечной сварки при изменении напряжения на 15 % получается 100 %-ный 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 % [2], [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 ток в нем, 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) [6], [7].

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.

Заключение

Практическое применение результатов исследования заключается в создании обоснованных предпосылок определения основных показателей надежности и потребляемой электроэнергии электрических систем при воздействии различных факторов. Результаты исследования позволят: 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.

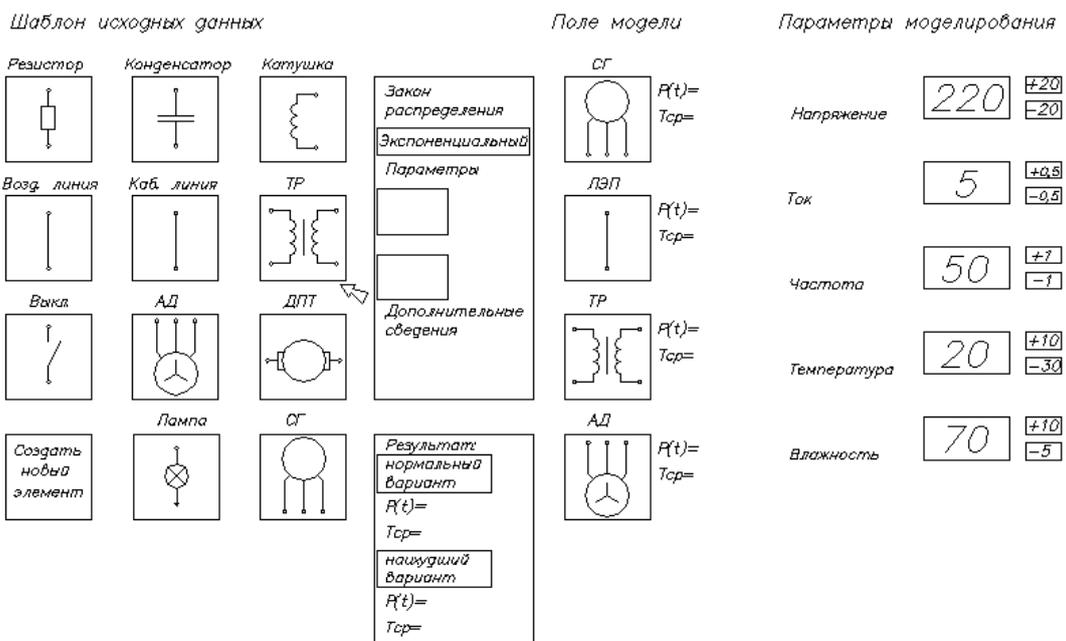


Рисунок 5.1 – Часть поля исходных данных математической модели расчета параметров надежности и электропотребления отдельных объектов и сложных технических систем

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 энергетического оборудования. – ПЭИПК. – Иваново, 2004. – С. 15–24.

2. Оболенцев, Ю.Б. Электрическое освещение общепромышленных помещений / Ю.Б. Оболенцев, Э.Л. Гиндин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.

3. Епанешников, М.М. Электрическое освещение / М.М. Епанешников. – М. : Энергия, 1973. – 352 с.

4. Сапрыка, А.В. Влияние низкого качества электроэнергии в сетях наружного освещения на энергоэффективность ламп высокого давления / А.В. Сапрыка // Вестник ХНАДУ. – 2007. – № 37. С. 25–32.

5. Головкин, П.И. Энергосистема и потребители электрической энергии. / П.И. Головкин. – М. : Энергия, 1979. – 350 с.

Поступила в редакцию 25.02.14.