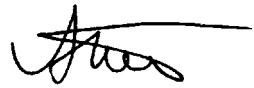


На правах рукописи

Панкин Александр Михайлович

**ИНФОРМАТИВНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧАХ
ИДЕНТИФИКАЦИИ И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Специальность: 05.09.05 - теоретическая электротехника



АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2004

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель -
доктор технических наук, профессор Башарин С. А.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Явленский А.К.
кандидат технических наук, доцент Усольцев А.А.

Ведущая организация - ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 21» апреля 2004 г. в 17 час.
на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского
Государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
(Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «19» марта 2004 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дзлийев С. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

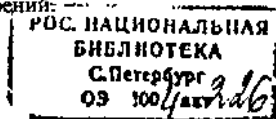
Актуальность темы. Научно-технический прогресс и бурное развитие вычислительной техники определяют необходимость пересмотра отношения к созданию систем диагностирования электротехнических и электронных устройств. Это связано с внедрением в практику построения систем диагностики персональных компьютеров (ПЭВМ) и интерфейсных устройств, включающих аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Их использование позволяет создавать достаточно мощные системы мониторинга технических объектов, к которым относятся и электрические цепи. С другой стороны, участвовавшие аварийные ситуации с электротехническим и электронным оборудованием на промышленных объектах определяют необходимость своевременного диагностирования особо ответственных блоков и систем, выход которых из строя может привести к тяжелым последствиям. Последнее обстоятельство приобретает особое значение, когда речь идет об объектах ядерной энергетики, в частности, измерительных каналах ядерных реакторов. Чтобы избежать несанкционированного срабатывания аварийной защиты (АЗ) реактора на подобных объектах производится дублирование каналов, входящих в состав системы управления и защиты (СУЗ). Своевременная замена неисправных блоков в этих каналах позволяет избежать более серьезных поломок всего канала в целом и других последствий, связанных с несвоевременной остановкой такого сложного и дорогостоящего объекта, каким является ядерный реактор.

Электронные блоки канала можно рассматривать как линейные и нелинейные электрические цепи, диагностика которых выполняется с помощью соответствующих диагностических средств в специальном режиме. Важность решения задач диагностики электрических цепей подтверждается тем, что определение диагностики вводится в ГОСТы по теоретической электротехнике. При этом под диагностикой электрических цепей понимается идентификация параметров их элементов при известной топологии по результатам измерений реакций цепи на заданное воздействие.

Разработке вопросов диагностики и обнаружения неисправностей в электрических цепях посвятили свои труды многие российские и зарубежные ученые. Вместе с тем, в настоящее время нельзя с полной уверенностью сказать, что создана завершенная методология диагностики электрических цепей, на основе которой могут решаться любые практические задачи. Особой задачей при этом является диагностирование параметров нелинейных цепей, к которым относятся схемы замещения большинства реальных электротехнических и электронных устройств.

Важным моментом в создании диагностической системы является возможность подключения измерительных приборов к доступным контрольным точкам диагностируемого объекта и оценка реальных погрешностей прямых и косвенных измерений. Последнее обстоятельство приводит к необходимости введения понятия информативности измерений, используемых для постановки диагноза о состоянии элементов электрической цепи в текущий момент времени. В результате решения этой задачи может быть предложена та или иная измерительная схема процесса диагностирования и определен режим функционирования диагностируемой электрической цепи во время такого процесса.

Цель работы. Целью работы является разработка методики диагностирования параметров элементов нелинейных электрических цепей, входящих в состав принципиальных электрических схем электронных блоков специальных технических объектов. Для этого в настоящей работе особое внимание уделяется вопросу исследования информативности диагностических измерений.



Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Определение информативности измерений для постановки диагноза о состоянии элементов электрической цепи и создание алгоритма диагностирования на основе матрицы информативности измеряемых величин.

2. Определение необходимого набора измеряемых величин напряжений и токов для диагностирования электрических цепей известной топологической структуры и идентификация параметров ее элементов с целью постановки диагноза об их состоянии.

3. Идентификация параметров модели диагностируемого блока при отсутствии информации о топологии его электрической цепи.

4. Разработка измерительных схем, алгоритмов и программ диагностики токовых ионизационных камер системы управления и защиты ядерного реактора и идентификация параметров их схем замещения.

- Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы положения теории электрических цепей, теории идентификации систем, технической диагностики и теории ошибок, численные методы решения систем уравнений; основным математическим аппаратом является теория определителей и матриц.

Достоверность полученных результатов подтверждается их совпадением с результатами, полученными при исследовании аналогичных электрических цепей другими методами, в том числе экспериментальными.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Введено определение информативности измерений по отношению к постановке диагноза о техническом состоянии элемента или системы. Предложен количественный критерий оценки информативности.

2. Введены матрицы информативности измерений по току и напряжению для электрической цепи с известной топологией. Получены формулы для оценки погрешности идентифицируемых параметров элементов в резистивных и динамических цепях.

3. Предложены два новых способа диагностирования токовых ионизационных камер (ИК) системы управления и защиты (СУЗ) ядерного реактора в тестовом и рабочем режимах. В случае рабочего режима ИК не отключается от СУЗ и диагностирование может быть выполнено на работающем реакторе.

Практическая ценность выполненной работы состоит в том, что:

1. Предлагаемые методы и методики определения информативности измерений в электрических цепях позволяют при разработке новых электронных изделий предусмотреть возможность подключения диагностической аппаратуры к наиболее информативным контрольным точкам после отработки этим изделием части своего ресурса, что повышает эффективность диагноза его технического состояния.

2. Новый способ диагностирования токовых ионизационных камер системы управления и защиты ядерного реактора дает возможность восстанавливать вольтамперные характеристики ИК в рабочем режиме без ее отключения от СУЗ на работающем реакторе.

3. Созданное в среде пакета MATLAB диагностическое программное обеспечение позволяет решать задачи идентификации параметров и характеристик элементов нелинейных электрических цепей, входящих в состав схем замещения базовых блоков новых диагностических комплексов, включающих ПЭВМ и АЦП.

Реализация результатов работы.

Результаты работы используются при создании новых диагностических комплексов на предприятиях Минатома РФ в г. Сосновый Бор Ленинградской области.

Апробация работы.

Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались на международных конференциях и симпозиумах:

- 4-м международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии в г. С. Петербурге (2001 г.),
- международной конференции по морским интеллектуальным технологиям в г. С. Петербурге (2001 г.)
- 15-й международной конференции по неразрушающему контролю в Италии (Рим, 2000 г.),
- международной конференции по проблемам автоматизированного электропривода в Крыму (2002 г.),
- 2-й международной научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии" в г. Одессе (2001 г.),
- - международных научно-технических конференциях в г. Сочи (с 1998 по 2003 гг.),
- международной конференции и симпозиумах в г. Пенза (с 1998 по 2003 гг.);

на Российских конференциях и симпозиумах:

- 15-й Российской научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и диагностика" в г. Москве (1999 г.),
- 10-й научно-технической конференции в г. Петродворце (1999 г.),
- научно-производственной конференции "Развитие атомной энергетики и возможности продления службы атомных энергоблоков АЭС" (С. Петербург - Сосновый Бор, 1999 г.),
- 2-й научно-технической конференции "Создание новой техники для АЭС. Импортозамещение." в г. Сочи (2003 г.),
- на профессорско-преподавательской конференции в СПбГЭТУ "ЛЭТИ" (2000 г.);

на школах-семинарах по технической диагностике в г. Ивано-Франковске (1999, 2001 гг.), в г. Йошкар-Ола (2000, 2002 гг.),

Публикации. Опубликовано 36 научных работ. По теме диссертации опубликовано 31 работа, из них: 2 патента на изобретение РФ, 6 статей, 10 докладов и тезисы к 13 - ти докладом на Российских и международных научно-технических конференциях и симпозиумах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 133 наименования, и двух приложений. Основная часть работы изложена на 217 страницах машинописного текста. Работа содержит 39 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, обозначен предмет исследований, определена цель и сформулированы направления исследований, определяющие практическую направленность и логическую связь глав диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены основные положения технической диагностики и теории ошибок, используемые далее в работе, выполнен обзор основных методов диагностирования электрических цепей. Особое внимание обращено на оценку погрешности результатов прямых и косвенных измерений.

Процесс диагностирования электрической цепи (известной или неизвестной топологии) начинается с построения ее математической модели, обычно представляемой

в виде системы алгебраических или дифференциальных уравнений. При заданных целях диагностирования вид модели примерно известен (по крайней мере, с точностью до класса функций), а определению подлежат параметры модели, которые находятся по результатам наблюдений над входными и выходными величинами, полученными в режимах рабочего или тестового диагностирования цепи или при их комбинации. В ряде случаев неизвестные параметры модели электрической цепи могут совпадать с параметрами элементов ветвей эквивалентной схемы замещения диагностируемой цепи. Задача диагностики совпадает с задачей идентификации в том случае, если в качестве оператора, описывающего электрическую цепь, принята ее принципиальная схема и определяются параметры диагностируемых элементов.

Среди множества методов диагностики можно условно выделить несколько групп:

- методы справочников, при составлении которых могут быть использованы режимы по постоянному току, а также представления в частотной и временной областях;
- методы параметрической идентификации, при реализации которых используются линейные и нелинейные диагностические уравнения;
- методы контроля неисправностей, среди которых следует выделить метод декомпозиции схем, имеющий большую практическую значимость при ограниченных объемах измерительной информации;
- приближенные методы (вероятностные и оптимизационные).

При практическом использовании тех или иных методов обнаружения неисправностей или диагностирования возникает целый ряд проблем, которые могут сделать применение этих методов невозможным для решения конкретной задачи. Выбор метода диагностирования решается в зависимости от условий задачи: возможности проверки в рабочем режиме, типа схемы, доступности тестовых узлов, робастности, типа неисправности, глубины диагностики и т. п. Если первые три условия связаны в большей степени с конструктивными особенностями диагностируемого изделия, то остальные можно отнести к качеству используемых диагностических методов.

Значительное количество методов и разнообразие подходов, применяемых при диагностировании электрических цепей, определяет актуальность рассматриваемой задачи, а многообразие постановок и сложность процедур диагностирования, особенно, когда речь идет о диагностировании нелинейных цепей, говорит о необходимости продолжения исследований в этом направлении.

Во второй главе вводится понятие информативности измерений при постановке диагноза о состоянии элементов электрических цепей и рассматриваются вопросы оценки погрешности контролируемого параметра в резистивной и динамической цепях.

Электрическую цепь можно считать работоспособной, если величины токов и напряжений в цепи не превышают допустимых пределов. Диапазон возможного изменения параметров элементов цепи шире, чем поле допусков, накладываемое на эти величины. На предельные значения некоторых величин априорно могут быть также наложены дополнительные ограничения, вытекающие из физической природы рассматриваемых элементов. Для примера можно привести ограничения, вводимые на допустимые напряжения для емкостей (напряжения пробоя) или допустимые значения мощностей резисторов.

Задачу диагностирования состояния элементов электрической цепи можно сформулировать следующим образом. Имеется некоторый набор элементов S_1, S_2, \dots, S_n относительно которых есть предположение, что значения параметров этих элементов R_1, R_2, \dots, R_n могут выходить за пределы допусков, предусмотренных технической документацией. С математической точки зрения это означает, что для элемента S_i не выполняется неравенство:

$$R_i^H - \Delta_i^- \leq R_i \leq R_i^H + \Delta_i^+,$$

где Δ_i^* , Δ_i - значения верхнего и нижнего допусков на величину диагностируемого параметра R_i ; R_i^H - номинальное значение параметра. В самом общем случае исправного и неисправного состояний элемента предполагается выполнение неравенства:

$$R_i^{\min} \leq R_i \leq R_i^{\max},$$

где K_i^{\max} , K_i^{\min} - максимально и минимально возможные величины параметра R ($R_i^{\min} \geq 0$).

Решение задачи - диагностирования представляем состоящей в определении следующих величин:

- вероятностей нахождения элемента S_i в технически исправном (P/) или неисправном (P_2) состояниях;
- информативности выполненного измерения или измерений для постановки диагноза о состоянии элемента S_i .

Для оценки априорных и апостериорных вероятностей по результатам измерения параметра R_i на рис. 1 представлены три пары чисел: (a_1, a_2) , (a_3, a_4) , (a_5, a_6) , являющихся границами интервалов физически возможных, нормативно-допустимых и реальных значений измеряемого параметра.

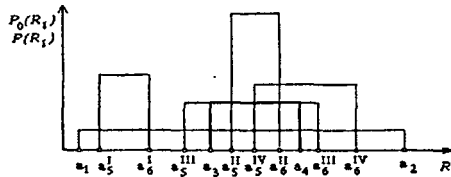


Рис. 1

После рассмотрения возможных случаев соотношения между этими парами чисел могут быть сделаны следующие выводы:

1. С точки зрения постановки диагноза о техническом состоянии элемента S_i в ряде случаев существенным является не точность измерений, а соотношения между граничными значениями интервала нормативно-допустимых значений параметра R_i и интервала, в котором по результатам измерений находится действительное значение R_i .

2. Об информативности конкретного измерения параметра R_i при постановке диагноза о техническом состоянии элемента S_i , когда имеются основная и альтернативная гипотезы, можно судить, например, по величине •

$$I_{R_i} = \frac{A \cdot \left| P_1^0 - \frac{1}{2} \right|}{\left| P_1^0 - \frac{1}{2} \right| + 1} = \frac{A \cdot \left| P_2^0 - \frac{1}{2} \right|}{\left| P_2^0 - \frac{1}{2} \right| + 1} \quad (9)$$

В выражении (1): A_i - некоторый коэффициент, который нормирует величину информативности в диапазоне значений $0 \leq I_{R_i} \leq 1$; P_1^0 , P_2^0 - априорные вероятности.

Определяющей величиной в последнем выражении является величина отклонения той или иной вероятности от 0,5 при двух возможных альтернативных состояниях диагностируемого элемента S_i . Возможны и другие количественные оценки величины I_{R_i} .

Таким образом, можно определить информативность проведенного измерения, как величину, позволяющую с большей или меньшей вероятностью поставить диагноз о техническом состоянии элемента (объекта) на основе данного измерения.

После определения информативности измерения отдельного параметра могут быть получены матрицы информативности по току и напряжению для всех элементов

резистивных и динамических цепей. Рассмотрим резистивную цепь, состоящую из p ветвей, в каждой из которых находится по одному резистивному элементу (при этом ветви рассматриваются как обобщенные, включающие источники напряжения и тока). Для идентификации параметра каждого из резисторов можно рассмотреть шесть различных случаев измерений. Если исключить два случая, как наиболее тривиальные (непосредственное измерение параметра и одновременное измерение тока и напряжения в ветви с этим элементом), то остальные позволяют получить две матрицы информативности, коэффициенты которых определяются по формуле (1). Матрица информативности по измерениям токов I_j в ветвях цепи ($j=1,2,\dots,p$) имеет вид:

$$[I^i] = \begin{bmatrix} I_{11}^i & I_{12}^i & I_{1p}^i \\ I_{21}^i & I_{22}^i & I_{2p}^i \\ \dots & \dots & \dots \\ I_{p1}^i & I_{p2}^i & I_{pp}^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Первый индекс коэффициента матрицы I_{ij}^i указывает номер ветви с диагностируемым элементом ($i=1, 2, \dots, p$), второй индекс - номер ветви с измеряемым током I_j , ($j=1, 2, \dots, p$). Аналогично матрице (2) получается матрица информативности \hat{I}^U по измерениям напряжений U_j , ($j=1, 2, \dots, p$). Из этих двух матриц может быть составлена смешанная матрица максимальной информативности $\hat{I}^{U,I}$ измерений токов и напряжений в ветвях схемы с известной топологией. Поскольку на практике не все измерения могут быть реализованы, то для невыполнимых измерений предлагается положить соответствующие коэффициенты равными 0.

Введенная таким образом матрица позволяет определить наиболее информативный набор измеряемых величин на стадии конструирования радиоэлектронных изделий, что дает возможность предусмотреть создание необходимых контрольных точек для эффективного диагностирования этих объектов в будущем.

Процессы, протекающие в динамических цепях, т.е. в цепях, содержащих идеальные R, L и C элементы, описываются с помощью дифференциальных уравнений. При решении задачи идентификации параметров динамической цепи в этом разделе пойдём по пути представления ее в виде чисто резистивной цепи, что позволяет воспользоваться результатами, полученными для резистивных цепей.

Предположим, что в цепи содержится только один реактивный элемент в виде индуктивности, который находится в i -той ветви ($i=1,2,\dots,p$). Для иллюстрации процедуры определения информативности измерений представим уравнение этого элемента в дискретном виде:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}; \quad U_{L,j} = \frac{L}{h} (I_{L,j} - I_{L,j-1}); \quad j=1,2,\dots,N, \quad \text{где } L - \text{ шаг разностной сетки}$$

Тогда в математической модели цепи можно перейти от системы дифференциальных уравнений к системе чисто алгебраических уравнений, и рассмотреть все шесть случаев возможных измерений величин тока и напряжения в ветвях этой цепи. Так, например, в случае измерения тока в i той ветви формулы для оценки неизвестного параметра L_i на j - том шаге разностной сетки по времени имеют вид:

$$L_i(t_j) = \frac{h(Q - A I_{ij})}{B (I_{ij} - I_{i,j-1})}; \quad \Delta L_i(t_j) = h \frac{(AQ + A \Delta I_{ij}) |I_{ij} - I_{i,j-1}| + \Delta I_{ij} - I_{i,j-1} |Q - A I_{ij}|}{|A (I_{ij} - I_{i,j-1})|^2}, \quad j=1,2,\dots,N \quad (3)$$

где A, B - некоторые константы, вычисляемые через определители матрицы исходной алгебраической системы; Q — величина, учитывающая наличие источников тока и напряжения в ветвях диагностируемой схемы.

После нахождения величины параметра и его погрешности определяется коэффициент информативности по измерению тока в i -той ветви. Для нахождения величин погрешности и информативности по измерению тока в j -той ветви ($i \neq j$) можно поступить аналогичным образом, только формулы получаются более сложными. В результате может быть получена матрица информативности измерений тока на j -том временном шаге. Аналогичным образом получается матрица информативности и при измерении напряжения. При переходе к очередному шагу матрицы информативности изменяются. При этом, в случае линейной цепи, может быть определена оптимальная точка по времени для диагностирования конкретного элемента цепи. Рассуждая аналогично, можно получить выражения, подобные (3) и для емкостного элемента.

Далее, во второй главе рассматривается случай, когда в диагностируемой цепи имеется несколько реактивных элементов (индуктивностей и емкостей), дискретные уравнения которых представлены более сложным образом по сравнению с выше рассмотренной аппроксимацией. При рассмотрении дифференциального уравнения индуктивного элемента можно предположить, что величина тока $I_L(t)$ измеряется на заданном интервале $[t_0, t_0+T]$ в N точках $t_k, k=0, 1, \dots, N-1$ при равномерной сетке разбиения отстоят друг от друга на величину шага (или интервала дискретизации) $h = T/N$. Значение $I_L(t_0)$ известно из начальных условий.

В результате получается последовательность величин: $I_L(t_0), I_L(t_1), \dots, I_L(t_N)$. На основании значений этих величин выполняется аппроксимация тока $I_L(t)$ некоторой аналитической функцией на всем интервале измерений $[t_0, t_0+T]$ или какой-то его части. После этого может быть выполнено дифференцирование или интегрирование этих функций в аналитическом виде.

Коэффициенты аппроксимации определяются на интервале $[t_{N_1}, t_{N_2}]$:

$0 \leq N_1 < N$; $0 < N_2 \leq N$; $N_1 < N_2$; $M = N_2 - N_1 + 1$ - количество коэффициентов аппроксимации.

Для их нахождения записывается система алгебраических уравнений, в правой части которой находятся известные значения измеренных или вычисленных на предыдущих шагах разностной сетки величин токов и напряжений. После выполнения операций дифференцирования или интегрирования найденных зависимостей получаются дискретные уравнения накопительных элементов диагностируемой цепи.

Дискретное уравнение для обобщенного элемента (резистор, индуктивность, емкость) в j -той ветви, связывающее напряжение в точке j с током, измеренным в моменты времени t_r ($r=0, 1, \dots, N_2$), может быть представлено в виде:

$$U_{i,j} = W_{i,N_1} + S_1 \cdot \sum_{r=N_1}^{N_2} I_{i,r} \cdot Z_{r,j}^I = W_{i,N_1} + S_1 \cdot I_{i,j} \cdot Z_{j,j}^I + S_1 \cdot \sum_{r \neq j} I_{i,r} \cdot Z_{r,j}^I \quad (4)$$

В этом уравнении в качестве параметра S_1 может рассматриваться сопротивление, индуктивность или емкость. Приняты следующие обозначения:

$W_{i,N_1} = 0$; $Z_{j,j}^I = 1$; $Z_{r,j}^I (r \neq j) = 0$ - для резистивного элемента;

$W_{i,N_1} = 0$; $Z_{r,j}^I = X_{r,j}^I$ - для индуктивного элемента;

$W_{i,N_1} = U_{i,N_1}$; $Z_{r,j}^I = Y_{r,j}^I$ - для емкостного элемента.

Аналогично (4) записывается уравнение для обобщенного элемента, связывающее ток в точке j с напряжением, измеренным в моменты времени t_r ($r=0, 1, \dots, N_2$).

Полученные выражения подставляются в уравнения цепи, сведенные, таким образом, к алгебраическим уравнениям. Далее следуют те же преобразования, что и в случае резистивной цепи. В результате находятся значения идентифицируемых параметров и их погрешностей, позволяющие определить информативность выполненного измерения. В конечном итоге процесс диагностирования элемента электрической цепи, также как и любого другого технического объекта, заканчивается принятием решения о техническом состоянии отдельного элемента или всей цепи в целом.

Рассмотренный подход может быть применен в случае диагностирования линейных и нелинейных цепей с известной топологией. При этом необходимо оптимально распределить интервалы аппроксимации $[t_{N_1}, t_{N_2}]$, так как в пределах одного интервала значение определяемого параметра считается постоянной величиной. Следует также помнить, что существует возможность некоторого отклонения от номинальных значений параметров других элементов цепи. Поэтому перед принятием окончательного решения о техническом состоянии исследуемого элемента следует повторить проведенные расчеты с вариацией этих параметров (проверка на робастность).

В третьей главе рассматриваются вопросы идентификации параметров элементов электрических цепей при различных объемах измерительной информации

Постановка диагноза о техническом состоянии контролируемой цепи связана с обработкой информации, получаемой в доступных контрольных точках. В то же время какие-то измерения могут оказаться избыточными. Если возможности измерений ограничены, т.е. некоторые переменные в цепи недоступны для измерений по тем или иным причинам, то состояние цепи приходится оценивать по имеющемуся набору измеренных величин. Главной задачей, которую приходится решать при ограничении диагностических измерений, это выбор необходимого и достаточного количества измерений для определения параметров или характеристик конкретного элемента или набора элементов цепи. При этом не всегда имеется возможность измерять токовые величины. В качестве измеряемых величин напряжения могут рассматриваться узловые напряжения в доступных узлах схемы диагностируемой цепи.

Рассмотрим чисто резистивную цепь, состоящую из p ветвей. Известно, что для идентификации параметров всех резисторов цепи, количество косвенно измеряемых величин, лежит в диапазоне: $p \leq N^{коэф.} \leq 2p$. Верхняя граница уже рассматривалась во второй главе, когда идентифицировался один параметр схемы (случай одновременного измерения тока и напряжения в ветвях схемы). Что касается нижней оценки $N_{min}^{коэф.} = p$, то не сложно показать, что это возможно при известных значениях напряжений \vec{u}_D в ветвях дерева графа схемы и токов \vec{i}_X в хордах графа. При этом сами значения параметров ветвей дерева \vec{R}_D , хорд \vec{R}_X и их погрешности могут быть вычислены по формулам:

$$(R_{Dk})_k = \frac{(u_{Dk})_k - (u_0)_k}{(i_k)_k} = \frac{(u_{Dk})_k - (u_0)_k}{-\sum_{j=1}^k f_{j,k} \cdot (i_x)_j}; \quad \Delta(R_{Dk})_k = \frac{[\Delta(u_{Dk})_k + \Delta(u_0)_k] \cdot \left| \sum_{j=1}^k f_{j,k} \cdot (i_x)_j \right| + |(u_{Dk})_k - (u_0)_k| \cdot \left| \sum_{j=1}^k |f_{j,k}| \cdot \Delta(i_x)_j \right|}{\left[\sum_{j=1}^k f_{j,k} \cdot (i_x)_j \right]^2};$$

$k=1, 2, \dots, q_1;$

$$(R_{Xk})_k = \frac{1}{G_k} = \frac{(u_x)_k}{(i_x)_k - (i_0)_k} = \frac{\sum_{j=1}^k f_{j,k} \cdot (u_{Dj})_j}{(i_x)_k - (i_0)_k}; \quad (\Delta R_{Xk})_k = \frac{[(i_x)_k - (i_0)_k] \cdot \left| \sum_{j=1}^k |f_{j,k}| \cdot \Delta(u_{Dj})_j \right| + \sum_{j=1}^k |f_{j,k}| \cdot (u_{Dj})_j \cdot \left| \Delta(i_x)_k + \Delta(i_0)_k \right|}{\left[(i_x)_k - (i_0)_k \right]^2} \quad (5)$$

$k=1, 2, \dots, n,$

где q_1 - количество независимых узлов; n - количество независимых контуров; $f_{j,k}$ - элементы информационной матрицы схемы. При определении погрешностей $\Delta R_{j,k}$ учитывались также погрешности определения воздействий цепи в виде $\Delta(u_k)_k$ и $\Delta(i_k)_k$.

Как правило, в реальной ситуации нет возможности подключать аппаратуру для измерения всех токов и напряжений, необходимых для определения параметров элементов всех p ветвей цепи. Более того, в ряде случаев нельзя разрывать цепь для подключения измерителя тока. Необходимо также заметить, что использование в современной диагностической аппаратуре АЦП, соединенных с персональными компьютерами, также ориентировано на измерение величин напряжения, нормированных в заданных диапазонах. Поэтому в дальнейшем в качестве основных измеряемых величин в данной работе предлагается рассматривать узловые напряжения. Однако без определения величин тока при идентификации резистивных и накопительных элементов не обойтись. Поэтому рассмотрим некоторые пути их определения и установим минимально необходимое количество этих величин для диагностирования элементов схемы или ее отдельных частей.

При недостатке токовых величин для решения задач диагностики можно следовать двумя путями: первый путь - предварительное введение в некоторые ветви цепи дополнительных («опорных») элементов относительно, которых нет оснований, сомневаться в точности их параметров, и которые не изменяют функциональные характеристики диагностируемого изделия. Это - путь увеличения количества узлов схемы и, соответственно, измеренных напряжений. Необходимые для дальнейшей идентификации токовые величины находятся из уравнений таких «опорных» элементов; второй путь - укрупнение частей диагностируемой схемы в результате объединения ряда ветвей и уменьшения количества независимых контуров исходной схемы. В этом случае происходит переход к новым диагностическим признакам в виде параметров или вольтамперных характеристик «диагностических двухполюсников»

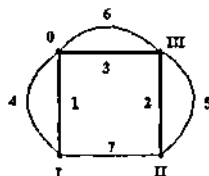
В общем случае схемы, состоящей из p ветвей с l независимыми контурами, количество наборов из l ветвей с известными токами, позволяющее решить задачу полной идентификации параметров схемы (при известных узловых напряжениях), может быть определено по формуле: $m = C_p^l - q_n$. где C_p^l - число сочетаний из p по l элементов, q_n - количество узлов схемы, в которых сходятся l ветвей.

Наборы из n ветвей, для которых эта задача не решается, могут быть определены по номерам ветвей, сходящихся в этих q_m узлах. Если количество известных токов $n_l < n$, то решается задача частичной идентификации и количество идентифицируемых параметров n_x схемы лежит в пределах $n_l \leq n_x < p$. Знак " $>>$ " в левой части неравенства будет иметь место при наличии в ветвях схемы источников ЭДС.

Представим теперь задачу нахождения структур «диагностических двухполюсников» таким образом, чтобы внутри них находилось как можно меньше ветвей с идентифицируемыми параметрами. В этом случае может возрасти общее число диагностических признаков, равное $n_x + n_y$. На рис. 2 представлен вариант задачи частичной идентификации. При этом: n_1 - количество известных токов; n_2 - количество идентифицируемых параметров; n_3 - количество идентифицируемых двухполюсников.

В реальной ситуации нередко отсутствует возможность не только измерять токи во всех хордах схемы, но и измерять напряжения во всех ее узлах. Поэтому наряду с недостатком информации по токам в ветвях, может быть и недостаток информации по напряжениям на элементах схемы. Это может в значительной мере повлиять на результаты диагностирования в тех случаях, когда нет возможности измерять величины

$$\begin{aligned}
 p &= 7, n = 4, q_1 = 3 \\
 n_i &= 1, n_x + n_y = 1 + 1 = 2 \\
 n_f &= 2, n_x = 3; n_z = 2
 \end{aligned}$$



$$n_x + n_y = 3 + 1 = 4;$$

$$n_x + n_y = 2 + 2 = 4$$

$$n_x + n_y = 3 + 3 = 6$$

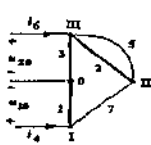
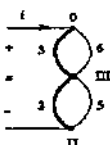
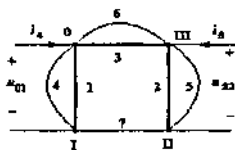


Рис. 2



напряжения в узлах, не являющихся внутренними для «диагностических двухполосников». Тогда необходимо найти возможность диагностировать электрическую схему по другому набору диагностических признаков.

В работе приводится пример решения задачи диагностики, когда в качестве диагностических признаков выступают комплексы параметров элементов разных ветвей схемы, и рассматриваются условия решения такой задачи. Кроме этого, приводятся пути решения задач диагностики при неизвестной топологии диагностируемой цепи. В качестве контролируемых величин в этом случае могут выступать параметры или характеристики математической модели электрической цепи. Если структура цепи неизвестна, ее свойства можно описать, построив математическую макромодел в виде системы уравнений состояния. Диагностирование свойств цепи при этом выполняется путем идентификации параметров уравнений состояния. Алгоритм идентификации основан на построении функциональной макромодел динамической цепи и инверсии алгоритма метода численного интегрирования.

В дискретной форме, когда в первом приближении уравнения состояния заменяются уравнениями в конечных разностях, их можно записать следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta x_1}{\Delta t} \\ \frac{\Delta x_2}{\Delta t} \\ \dots \\ \frac{\Delta x_n}{\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_{11} & \dots & b_{1m} \\ a_{21} & \dots & a_{2n} & b_{21} & \dots & b_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} & b_{n1} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \\ e_1 \\ \dots \\ e_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

или в матричной форме: $\Delta \vec{x} = \delta \cdot \hat{L} \cdot \vec{w}$,

где \hat{L} - расширенная матрица параметров, в которой $a_{11} \dots a_{nn}$ и $b_{11} \dots b_{nm}$ - коэффициенты матриц канонических уравнений состояния, δ - временной интервал дискретизации, $\vec{w} = [x_1, x_2, \dots, x_n, e_1, e_2, \dots, e_m]^T$ - обобщенный вектор переменных состояния и воздействий для дискретных (точечных) спектров сигналов (дискретный спектр состояния), n - порядок вектора откликов, m - порядок вектора воздействий. Матрица $\hat{L} = [\hat{A} \cdot \hat{B}]$ определяет математическую модель динамической цепи с неизвестной топологией («черный ящик») и представляет собой матричный оператор, связывающий множество входных и выходных сигналов. Для определения $n+m$ элементов одной строки оператора \hat{L} необходимо сформировать $n+m$ независимых алгебраических уравнений. Для этой цели применяется процедура смешения разностного

уравнения на Δt интервалов дискретизации, что позволяет увеличить размерность системы уравнений до числа неизвестных коэффициентов строки оператора \hat{L} .

$$\begin{aligned} [x_{1,j+1} - x_{1,j}] &= \delta \cdot [a_{11} \dots a_{1n} \ b_{11} \dots b_{1m}] [x_{1,j} \dots x_{n,j} \ e_{1,j} \dots e_{m,j}] \\ [x_{2,j+1} - x_{2,j}] &= \delta \cdot [a_{21} \dots a_{2n} \ b_{21} \dots b_{2m}] [x_{1,j+1} \dots x_{n,j+1} \ e_{1,j+1} \dots e_{m,j+1}] \\ &\dots \\ [x_{l,j+1} - x_{l,j+1-n}] &= \delta \cdot [a_{l1} \dots a_{ln} \ b_{l1} \dots b_{lm}] [x_{1,j+1-n} \dots x_{n,j+1-n}] \end{aligned} \quad (7)$$

Решая совместно уравнения (7) можно определить значения коэффициентов \vec{a} и \vec{b} первой строки матричного оператора \hat{L} , что соответствует операции идентификации параметров модели динамической цепи.

Повышение точности вычислений возможно, например, изменением алгоритма численной процедуры идентификации с построением синтетических схем инверсии алгоритма методов численного интегрирования. В зависимости от постановки задачи можно также изменить точность вычислений путем выбора шага дискретизации и др., однако погрешность вычислений во всех случаях будет иметь место.

В четвертой главе рассматриваются вопросы реализации процедуры диагностирования элементов и блоков электротехнических устройств различного назначения, решение которых позволяет подойти к созданию систем технического диагностирования широкого класса объектов электрической природы.

В настоящей работе в качестве объектов диагностирования рассматриваются блоки измерительных каналов системы управления и защиты (СУЗ) ядерного реактора, для которых предполагается создание методики диагностирования. При этом решается ряд задач: выбор измерительной схемы; выбор и реализация режима диагностирования; создание диагностического программного обеспечения

В рассматриваемом варианте системы диагностирования предполагается наличие следующих основных блоков: системы, подключения к контрольным точкам диагностируемого блока (набор измерительных каналов); интерфейсной системы между системой регистрации экспериментальной информации и диагностическим программным обеспечением в виде аналого-цифрового преобразователя (АЦП) информации; системы обработки информации и выдачи диагноза о состоянии диагностируемого блока.

В этой главе рассмотрено решение нескольких задач, имеющих практическое значение в диагностических системах. В качестве первой из них предлагается методика идентификация нелинейной вольтамперной характеристики источника напряжения на основе измерения узловых напряжений. Используемые в диагностических схемах источники напряжения в виде батарей химических элементов обладают в ряде случаев преимуществом в части автономности источников питания. Однако, со временем их свойства меняются, что вызывает изменение их параметров: величины ЭДС E и внутреннего сопротивления r_0 . Как показывает практика увеличение r_0 (величины, которая по определению должна быть очень малой) в ряде случаев может существенно изменить процесс регистрации контролируемых величин. Поэтому перед реализацией основного режима диагностирования желательно уточнить параметр r_0 или ВАХ, используемого источника напряжения. Для этого предлагается реализовать режим тестового диагностирования "источника • напряжения," периодически включаемого на зарядку и разрядку конденсатора с помощью специального ключа. На основе измеренных с помощью АЦП узловых напряжений восстанавливается ВАХ источника в соответствии с формулами, приведенными во второй и третьей главах. Одновременно может быть выполнена идентификация входных сопротивлений измерительных каналов. В данной главе выполнение такой процедуры представлено с помощью резистивно-емкостных схем первого и второго порядков.

В качестве другой задачи рассматривается идентификация вольтамперной характеристики ионизационной камеры (ИК) системы управления и защиты (СУЗ) ядерного реактора. Вольтамперная характеристика ИК может рассматриваться как ВАХ нелинейного двухполюсника, зависящая от параметра. В качестве параметра выступает мощность ядерного реактора или нейтронный поток в месте расположения камеры. Семейство ВАХ для разных значений нейтронного потока представлено на рис. 3.

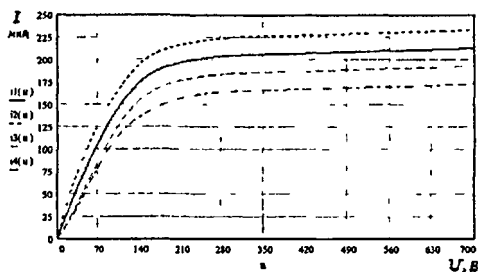


Рис.3

На рис. 4 и 5 представлены схема замещения измерительной цепи и топологический граф цепи, используемые при решении задачи идентификации параметров:

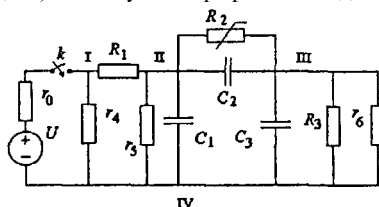


Рис. 4

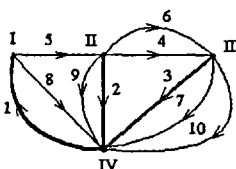


Рис. 5

На этой схеме: C_1, C_2, C_3 — емкости ИК; R_2 - нелинейное сопротивление рабочего газового объема ИК; R_1 - регулировочное сопротивление; R_3 — сопротивление нагрузки; U, r_0 - ЭДС и внутреннее сопротивление источника напряжения камеры; r_4, r_3, r_6 - сопротивления измерительных трактов.

На основе приведенной схемы построена математическая модель цепи в виде системы уравнений относительно напряжений в ветвях дерева графа схемы: u_1, u_2, u_3 . При решении задачи идентификации получается ВАХ нелинейного двухполюсника R_2 и некоторые другие параметры схемы.

В работе приведены формулы для вычисления идентифицируемых параметров и их погрешностей, обусловленных погрешностями непосредственно измеряемых величин напряжения, в том числе и начальных условий. Погрешности вычислительных процедур оцениваются путем сравнения с более точными численными методами. Для некоторых случаев может быть получено аналитическое решение. Найденные оценки погрешностей используются для определения информативности отдельных измерений и решения задач диагностики элементов исследуемой цепи ИК.

На основе разработанных подходов предложены два новых способа диагностирования ИК в динамических режимах, на которые получены патенты РФ. В первом способе предлагается идентифицировать ВАХ ИК во всем диапазоне возможных значений питающего напряжения. Такая процедура реализуется путем подачи на

электроды камеры в начальный момент времени ступеньки по напряжению, высота которой равна максимально возможному напряжению ИК. Во время переходного процесса с помощью АЦП регистрируются узловые напряжения в контрольных точках схемы. Этот способ предполагает на время измерений отключение ИК от СУЗ ядерного реактора, так как при этом возможно изменение выходного тока камеры в широких пределах по сравнению с рабочим значением. Поэтому он относится к тестовым режимам диагностирования.

Во втором способе, названном рабочим способом диагностирования, реализуется подача на электроды ИК последовательности ступенек по напряжению небольшой высоты (в пределах допусков для нестабилизированного блока питания). Эти скачки напряжения генерируются вокруг номинального напряжения $U_{\text{ном}}$, подаваемого штатным блоком питания ИК. При этом идентифицируется только участок ВАХ в районе рабочего «плато», который представлен на рис. 6. В этом случае предполагается, что ИК не отключается от СУЗ реактора и что скорость изменения выходного тока камеры во время переходного процесса не приводит к срабатыванию аварийной защиты (АЗ) по периоду изменения мощности реактора.

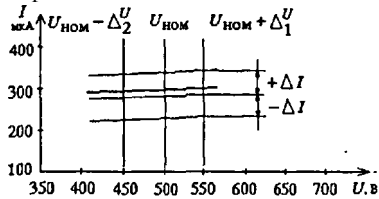


Рис. 6

В завершение этой главы рассматривается использование подходов, разработанных для цепей с сосредоточенными параметрами, при диагностировании протяженных кабельных трасс ("длинные линии").

В приложении представлены результаты расчетов при решении задач анализа цепи модели ИК и идентификации ее параметров, а также текст программы для оценки погрешностей диагностических признаков при определении информативности измерений узловых напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации исследованы вопросы информативности измерений и разработана методика диагностирования электрических цепей. На основе предложенных подходов в среде пакета MATLAB разработаны алгоритмы, введенные в диагностическое программное обеспечение, которое является важной частью создаваемой системы диагностирования объектов широкого назначения.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана методика диагностирования элементов электрических цепей на основе определения информативности реализуемых измерений.
2. Разработаны методики и приведены формулы для оценки погрешности косвенного измерения параметров элементов по результатам измерений токов и напряжений в различных ветвях резистивных и динамических цепей.
3. Введено определение информативности измерений для постановки диагноза о техническом состоянии элементов электрической цепи и предложен количественный критерий оценки информативности.
4. Даны рекомендации по определению диагностических признаков при разных объемах измерительной информации по величинам токов и напряжений и предложен способ перехода к новым диагностическим признакам при недостаточном объеме

измерений и в случае диагностирования динамической цепи неизвестной структуры.

5. Разработана электрическая схема замещения измерительной цепи для диагностирования ионизационной камеры (ИК) системы управления и защиты (СУЗ) ядерного реактора и алгоритм решения задачи идентификации ее ВАХ.

6. Предложены новые способы диагностирования токовых ионизационных камер нейтронно-физических каналов СУЗ ядерных реакторов в рабочем и тестовом режимах;

7. На основе разработанных методик построена концепция диагностирования блоков измерительных каналов ядерных реакторов и другого оборудования, рекомендованная для включения в программу Минатома РФ «Импортозамещение». Создание новой техники для АЭС."

Дальнейшие перспективы развития предлагаемых в работе методик, подходов и программных средств связаны со следующими актуальными проблемами:

- созданием новых малогабаритных автономных (от объекта диагностирования) диагностических комплексов на основе ПЭВМ (предпочтительнее типа "Note-book"), АЦП и ЦАП;

- созданием малогабаритных автономных (от объекта диагностирования) диагностических комплексов на основе ПЭВМ (типа "Note-book") и АЦП;

- конструированием новых электронных и электротехнических изделий с учетом их последующего диагностирования на основе оценки информативности измерений;

- расширением номенклатуры объектов диагностирования на основе предлагаемой методики диагностирования электрических цепей;

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Панкин А.М., Даниленко В.П., Башарин С.А. Моделирование ионизационной камеры нейтронно-физического канала СУЗ ядерного реактора для целей диагностики // Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. "Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем". Пенза. 25-31.05.1998. Пенза, 1998. С. 244-245.

2. Панкин А.М., Даниленко В.П., Ельшин А.В., Башарин С.А. Использование динамических процессов для целей диагностики ионизационной камеры нейтронно-физического канала СУЗ ядерного реактора // Материалы междунар. науч.-техн. конф. и Рос. науч. шк. "Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий". Сочи. 15-24.09.1998. М., 1998. Ч. 3. С. 76-79.

3. Панкин А.М., Даниленко В.П., Башарин С.А. Идентификационный контроль параметров элементов электрических цепей системы управления и защиты ядерного реактора в пространстве состояния // Материалы науч.-техн. конф. "Проблемы технического управления в региональной энергетике". Пенза. 17-18.11.1998. Пенза, 1998. С. 54-57.

4. Башарин С.А., Панкин А.М. Аспекты повышения надежности работы радиоэлектронных средств управления и защиты ядерных реакторов плавающих морских объектов // "Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы, подготовка специалистов": Тез. докл. 10-й науч.-техн. конф. (межвузовск.). Петродворец. 17-18.02.1999. Петродворец, 1999. Ч. 1. С. 307.

5. Башарин С.А., Панкин А.М. Идентификация и диагностика многополосников цепей управления и защиты ядерного реактора // Кн. докл. междунар. симпоз. "Надежность и качество". Пенза. 24-31.05.1999. Пенза, 1999. С. 451-452.

6. Панкин А.М., Даниленко В.П., Осенных В.А., Венкин В.А. Оперативный метод контроля состояния ионизационных камер СУЗ ядерного реактора // Материалы науч.-

произв. конф. "Развитие атомной энергетики и возможности продления сроков службы атомных энергоблоков ПСС АЭС-99". Санкт-Петербург - Сосновый Бор 24-26.05 1999. С.-Петербург, 1999. С. 89-90.

7. Панкин А.М., Даниленко В.П., Башарин С.А. Диагностика нелинейных цепей управления и защиты ядерного реактора на основе идентификации нестационарного магричного оператора // "Неразрушающий контроль и диагностика": Тез. докл. 15⁰⁸ Рос. науч.-техн. конф. М., 28.06-2.07.99. М., 1999. Т. 1. С. 45.

8. Панкин А.М., Даниленко В.П., Башарин С.А. Математическое моделирование электрических цепей блоков системы управления и защиты ядерного реактора для цепей диагностики // Материалы междунар. конф. "Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий". Сочи. 29.09-8.10.1999. М., 1999. Ч. 6. С. 39-40.

9. Башарин С.А., Даниленко В.П., Панкин А.М. Диагностика нелинейных трансформаторов в электрических цепях на основе идентификации их характеристик // "Розв'язка і розробка нафтових і газових родовищ" : Науково-технічний збірник. Вип. №36 (том 8) Львано-Франшвск, 1999. С. 164-168.

10. Пат. РФ №2154288/ А.М. Панкин, С.А. Башарин, В.П. Даниленко. Способ диагностирования ионизационной камеры системы управления и защиты ядерного реактора; Опубл. 10.08.00. Бюл. "Изобретения и полезные модели" № 22,2000.

11. Пат. РФ №2145427/ А.М. Панкин, С.А. Башарин, В.П. Даниленко, В.Ф. Борисов. Способ рабочего диагностирования ионизационной камеры системы управления и защиты ядерного реактора; Опубл. 10.02.00. Бюл. "Изобретения и полезные модели" № 4. 2000.

12. Панкин А.М., Башарин С.А. Качественное определение информативности измерений в резистивной цепи при диагностировании параметров ее элементов // Тр. междунар. симпоз. "Надежность и качество". 22-31.05.2000. Пенза, 2000. С. 310-311.

13. Башарин С.А., Панкин А.М. Аспекты информативности измерений в задачах диагностирования параметров электрических цепей // "Методы и средства технической диагностики" Сб. науч. статей, вып. 17-й /Йошкар-Ола, 2000. С.65-70.

14. Панкин А.М., Даниленко В.П., Башарин С.А. Диагностирование состояния элементов электрических цепей на основе алгоритма идентификации с инверсией численных процедур // Материалы междунар. конф. "Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий". Сочи. 29.09-8.10.2000. М., 2000. Ч. 3. С. 3-7.

15. Панкин А.М., Башарин С.А. Моделирование динамических процессов в нелинейных цепях блоков питания СУЗ ядерного реактора // Материалы междунар. научн.-практ. конф. "Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики". Новочеркасск, ЮРГУ (НПИ), 2000. Ч. 9. С.35-37.

16. A.M. Pankin, S.A. Basharin, V.P. Danilenko Condition Monitoring of Electrical Circuit Element of the Nuclear Reactor Measuring Channels (Контроль состояния элементов электрических цепей измерительных каналов ядерного реактора) // 15-th World Conference on Non-Destructive Testing //Roma(Italy):2000. (<http://www.ndt.net/article/wendt00/papers/idn544/idn544.htm>)

17. Башарин С.А., Панкин А.М. Компьютерная диагностика элементов электронных схем //Тр. 2-й междунар. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии". Одесса. 28-31.05.2001. Одесса, 2001. С. 256-257.

18. Панкин А.М. Анализ информативности измерений в задачах диагностирования электрических цепей с помощью метода узловых сопротивлений // Тр. междунар. симпоз. "Надежность и качество". Пенза. 21-31.05.2001. Пенза, 2001. С. 303-305.

19. Башарин С.А., Коровкин Н.В., Панкин А.М. Контроль состояния электрических цепей с распределенными параметрами на основе параметрической идентификации // Сб. науч. докл. 4-го междунар. симпоз. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии "ЭМС-2001". С.-Петербург. 19-22.06.2001. С.-Петербург, 2001. С. 113-118.

20. Панкин А.М. Диагностирование ионизационных камер системы управления и защиты ядерного реактора с использованием методов параметрической идентификации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. №7. С. 69-71.

21. Панкин А.М., Даниленко В.П. Алгоритмы и программное обеспечение автономных систем технического диагностирования // Сб. докл. 4-й междунар. конф. по морским интеллектуальным технологиям "МОРИНТЕХ-2001". С.-Петербург. 20-22.09.2001. С.-Петербург, 2001. Т. 1. С. 204-210.

22. Панкин А.М. Информативность измерений в задачах диагностирования электрических цепей // Материалы междунар. конф. "Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных, электронных и лазерных технологий". Сочи. 1-10.10.2001. М., 2001. Ч. 2. С.46-47.

23. Панкин А.М. Методика оценки информативности измерений при диагностировании элементов нелинейных электрических цепей // "Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ" Державний міжвідомчий науково-технічний збірник, вип.№38 (том 8) Авано-Франшвськ, 2001. С. 220-227.

24. Панкин А.М. Диагностирование электрических цепей при неизвестной топологии схемы // Тр. междунар. симпоз. "Надежность и качество ". Пенза. 27.05-2.06.2002. Пенза, 2002. С. 425-427.

25. Панкин А.М. Диагностирование электрических схем на основе метода узловых напряжений // "Методы и средства технической диагностики". Сб. науч. статей. Вып. 19-й / Йошкар-Ола, 2002. С. 22-30.

26. Василенко В.А., Панкин А.М., Травин С.Я. Система индикации дефектов в трубах на основе метода вихревых токов // Материалы междунар. конф. "Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных, электронных и лазерных технологий". Сочи. 1-12.10.2002. М., Радио и связь. 2002. Ч. 2. С. 145.

27. Панкин А.М., Даниленко В.П., Башарин С.А. Диагностика трансформаторов на основе идентификации параметров элементов // "Проблемы автоматизированного электропривода." Вести. Харьковского политехнического института. Серия "Электротехника, электроника и электропривод". Вып. 12. Т. 1/ Харьков, 2002. С. 130-133.

28. Панкин А.М. Травин С.Я. Контроль и прогнозирование технического состояния труб методом электромагнитной индукции // Тр. междунар. симпоз. "Надежность и качество ". Пенза. 26.05-1.06.2003. Пенза, 2003. С. 303-305.

29. Панкин А.М. Идентификация параметров схемы ионизационной камеры в случае ее диагностирования // Тр. междунар. симпоз. "Надежность и качество ". Пенза. 26.05-1.06.2003. Пенза, 2003. С. 305-308.

30. Панкин А.М. К созданию малогабаритной системы диагностирования электронных, электротехнических блоков на основе методики диагностирования электрических цепей // Бюл. П -й науч.-техн. конф. "Создание новой техники для АЭС. Импортозамещение". Сочи. 19-23.05.2003. М., 2003. С. 75-83.

31. Панкин А.М., Башарин С.А. Условия идентифицируемости параметров элементов электрических цепей при диагностических измерениях // Материалы междунар. конф. "Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий". Сочи. 1-12.10.2003. М., Радио и связь. 2003. Ч. 1. С. 68-69.

ЛР № 020617 от 24. 06. 98

Подписано в печать 11.03.04. Формат 60*84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ 11.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

№ - 5634