

УДК 621.316

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Макаревич В.Н.

Научный руководитель – ст. пр. Макаревич В.В.

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.

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.

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.

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.

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 относительно которых есть предположение, что значения параметров этих элементов 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 Δi^- и Δi^+ - 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 R^{\min} , R^{\max} - максимально и минимально возможные величины параметра.

Для оценки априорных и апостериорных вероятностей по результатам измерения параметра R_i на рис. 1 представлены три пары чисел, являющихся границами интервалов физически возможных, нормативно-допустимых и реальных значений измеряемого параметра.

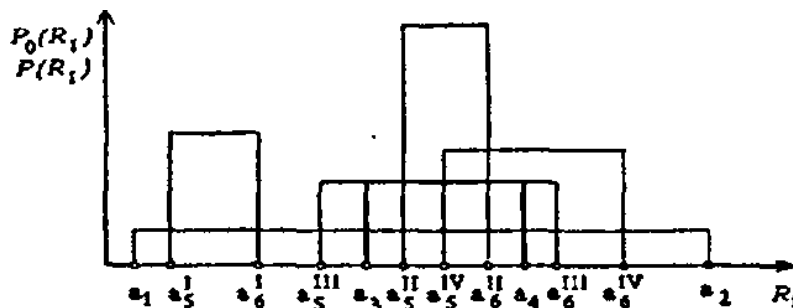


Рис. 1

Рисунок 1. Границы интервалов значений измеряемого параметра

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

$$I_{\beta} = A_i \cdot |P_i - 1/2| / |P_i^0 - 1/2| + 1,$$

Где A_i — некоторый коэффициент, который нормирует величину информативности в диапазоне значений $0 \leq I_k \leq 1$;

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_{Rt} .

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 в ветвях цепи имеет вид:

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

Рисунок 2. Матрица информативности

Первый индекс коэффициента матрицы указывает номер ветви с диагностируемым элементом $i = 1, 2, \dots, p$, второй индекс - номер ветви с измеряемым током. Аналогично получается матрица информативности по измерениям напряжений.

Из этих двух матриц может быть составлена смешанная матрица максимальной информативности 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 RLC 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. Для иллюстрации процедуры определения информативности измерений представим уравнение этого элемента в дискретном виде:

$$U_L = L \frac{d_{iL}}{dt} \quad U_{L,j} = \frac{L}{h} (I_{L,j} - I_{L,j-1}); \quad j = 1, 2, \dots$$

где h - 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 на j - том шаге разностной сетки по времени имеют вид:

$$L_i(t_j) = \frac{h \cdot (Q - A \cdot I_j)}{B \cdot (I_j - I_{j-1})},$$

$$j = 1, 2, \dots$$

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 l - той ветви ($l \neq i$) 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 и для емкостного элемента.

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: $p \leq N \leq 2p$. 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, то не сложно показать, что это возможно при известных значениях напряжений в ветвях дерева графа схемы и токов в хордах графа. При этом сами значения параметров ветвей дерева, хорд. 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 предлагается рассматривать узловые напряжения.

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: $m = C_p^n - q$, где C_p^n - число сочетаний из p по l элементов, q - 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 qm узлах. Если количество известных токов $n_1 \leq n$, то решается задача частичной идентификации и количество идентифицируемых параметров.

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 $n_x + n_y$.

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 напряжения в узлах, не являющихся внутренними для «диагностических двухполюсников». Тогда необходимо

найти возможность диагностировать электрическую схему по другому набору диагностических признаков.

Литература

1. 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.
2. 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.