

О ДИАГНОСТИКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Рассмотрены основные методы, применяемые для диагностики электрических цепей, которые в настоящее время является одним из интенсивно развиваемых и востребованных практикой разделов электротехники. Проанализированы достоинства и недостатки каждого метода, выявлены наиболее оптимальные из них.

Ключевые слова: диагностика, электрические цепи, метод узловых сопротивлений, жесткая модель, противоречивость данных, пассивные и активные цепи, погрешность.

В настоящее время, в связи с участвовавшими авариями в энергосистемах существует необходимость своевременного диагностирования электрических цепей, блоков и систем, выход которых из строя может привести к тяжелым последствиям [1]. Исследование вопросов диагностики электрических цепей остается актуальным, так как существует необходимость в её проведение для профилактики отказов электрического оборудования, ведущих к значительным материальным убыткам или угрозе человеческой жизни.

Под диагностикой электрических цепей понимают определение неизвестных параметров электрической цепи при известных топологии цепи, части параметров цепи и ее реакции на различные воздействия [2].

Вызванная исключительно запросами практики, подчиненная в прикладном отношении оценке технического состояния, работоспособности и надежности реальных объектов электроэнергетики и радиоэлектроники диагностика вооружает специалистов, занятых в области производства и эксплуатации этих объектов, теоретическими знаниями по соответствующим проблемам и рациональными методами их решения. Целью проведенного исследования являлось изучение и анализ основных методов диагностики электрических цепей, выявление эффективных и рациональных способов решения задач диагностики.

Нами проанализированы несколько основных методов, применяемых для диагностики пассивных и активных цепей.

Диагностика пассивных линейных резистивных цепей в условиях относительной свободы

В ходе выполнения диагностики электрической цепи важным моментом является наблюдаемость этой цепи. Цепь считается на-

блюдаемой по току, если данных достаточно для расчета токов всех ее ветвей, и наблюдаемой по напряжению, если данных достаточно для расчета напряжений всех ее ветвей [2], [3]. Ветви дополнения дерева – токи ветвей всех связей. Если они измерены, то цепь можно считать наблюдаемой по току. Если же измерены напряжения ветвей некоторого дерева, то цепь наблюдаема по напряжению. Рассчитаем токи ветвей дерева I_D и напряжения связей U_C . Используем для этого матричную запись законов Кирхгофа:

$$D \cdot \begin{pmatrix} I_D \\ I_C \end{pmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$C \cdot \begin{pmatrix} U_D \\ U_C \end{pmatrix} = 0 \quad (2)$$

где $D = \|1 - F^t\| = 0$ и $C = \|F, 1\| = 0$ – матрицы сечений и токов соответственно. Отсюда $I_D = F^t \cdot I_C$ и $U_C = -F \cdot U_D$.

Рассмотрим решение задачи диагностики цепи, изображенной на рисунке 1, наблюдаемой по току и напряжению.

Вольтметры подсоединены к ветвям 1, 2, 3, входящим в дерево цепи, амперметры включены в ветви связей 4, 5. Вектор напряжений ветвей дерева $U_D = \|U_1 U_2 U_3\|^t$ и вектор токов связей дерева $I_C = \|I_4 I_5\|^t$ измеряются на экспериментальном этапе, а вектор токов ветвей дерева $I_D = \|I_1 I_2 I_3\|^t$ и вектор напряжений ветвей связей $U_C = \|U_4 U_5\|^t$ рассчитываются как:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ +1 & -1 \\ -1 & +1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_4 \\ I_5 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} U_4 \\ U_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В результате этих расчетов найдены значения источников, $E = U_2$ и $J = I_4$, а параметры резисторов рассчитаны по закону Ома: $r_1 = U_1 / I_1$, $r_3 = U_3 / I_3$, $r_5 = U_5 / I_5$ [2, 3].

Диагностика пассивных цепей методом узловых сопротивлений

Рассмотрим тестовую диагностику наблюдаемого по напряжению пассивного многополюсника П, изображенного на рисунке 2,а, топологическая структура которого неизвестна. Задачу тестовой диагностики можно считать решенной, если найдем матрицу узловых проводимостей цепи Y [2], [3]:

$$Y = \{Y_{ij}\}_{n,n} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

где $(n+1)$ – число узлов цепи. Матрица $Y^{-1} = Z = \{Z_{ij}\}_{n,n}$ – матрица узловых сопротивлений. Метод узловых сопротивлений – метод диагностики пассивных электрических цепей, который основан на экспериментальном определении узловых сопротивлений $Z_{i,j}$, где $i, j = 1, 2, \dots, n$, и дальнейшем числовом расчете матрицы $Y = Z^{-1}$ [4].

Для того чтобы реализовать метод узловых сопротивлений между узлами 0 и 1 многополюсника П (рисунок 2,б) необходимо включить источник тока равный 1 А [7]. При первом диагностическом эксперименте были измерены узловые напряжения $U_i^1, i = 1, 2, \dots, n$, которые удовлетворяют системе уравнений, в которой неизвестными являются коэффициенты матрицы Y .

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1^1 \\ U_2^1 \\ \dots \\ U_n^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Для однозначного определения коэффициентов матрицы Y необходимо провести еще $(n - 1)$ эксперимент [2]. В каждом j -м эксперименте ($j = 2, 3, \dots, n$) нужно подключить между узлами 0 и j (рисунок 2,в) источник тока, чтобы обеспечить задающий ток j -го узла равным 1 А. После этого измеряют n узловых напряжений $U_i^j, i = 1, 2, \dots, n$. Система уравнений приняла вид:

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1j} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2j} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{j1} & Y_{j2} & \dots & Y_{jj} & \dots & Y_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nj} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1^j \\ U_2^j \\ \dots \\ U_j^j \\ \dots \\ U_n^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ J_j \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

где $U_i^j, i = 1, 2, \dots, n$ – узловые напряжения, измеренные в j -м эксперименте, а $J_j = 1$ А. Объединим данные системы:

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1^1 & U_2^1 & \dots & U_n^1 \\ U_2^2 & U_2^2 & \dots & U_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_n^1 & U_n^2 & \dots & U_n^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & J_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

или $Y \cdot U = J$ (9)

Проводя достаточно точные измерения напряжений, их значения будут численно совпадать со значениями узловых сопротивлений, т. е. $U_i^j = Z_{ij}$ [9]. Тогда решение задачи диагностики имеет вид (10):

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1^1 & U_2^1 & \dots & U_n^1 \\ U_2^1 & U_2^2 & \dots & U_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_n^1 & U_n^2 & \dots & U_n^n \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{pmatrix}^{-1}$$

Таким образом, сформировав по данным диагностических экспериментов матрицу узловых сопротивлений Z можно рассчитать искомую матрицу $Y = Z^{-1}$.

При достаточно малых погрешностях (0,01–3%) результаты диагностики получаются довольно точными; с увеличением погрешности (7%) ухудшается точность решения и определить структуру неизвестной цепи становится невозможно.

Диагностика электрических цепей в условиях неполноты и противоречивости исходных данных

На практике из-за ограниченности свободы в вариации режимов, недоступности целых подцепей для измерений (при неполной наблюдаемости цепи), неточности, грубости результатов измерений, неверной информации о топологической структуре цепи, использования большого количества элементов ключевой природы, изменение состояния которых (открыт, закрыт) меняет топологию цепи, экспериментальные данные часто отличаются неполнотой и противоречивостью. Решение соответствующей системы уравнений может не существовать, быть не единственным или неустойчивым.

Необходимо учитывать всю полноту информации о диагностируемом объекте, условия и средства осуществления экспериментального этапа работы; формировать математическую модель не

в виде системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), а в виде задачи минимизации функционала с ограничениями для СЛАУ. На расчетном этапе задачи диагностики находят единственное псевдорешение СЛАУ [2, 8].

Рассмотрим цепь, изображенную на рисунке 3. Показания амперметров A_1-A_3 обозначим как I_1, I_2, I_3 , а вольтметров V_1, V_2 как U_1, U_2 . Цепь наблюдаема по току и не полностью наблюдаема по напряжению (не известны напряжения на сопротивлениях r_3, r_4). Положим, что здесь $\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 \neq \tilde{I}_3$.

Экспериментальная информация в задаче диагностики неполна (ее недостаточно для определения r_3, r_4) и противоречива ($\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 \neq \tilde{I}_3$). Привлечем дополнительную информацию – паспортные значения искомых параметров элементов, соотношения между параметрами элементов, обусловленные их природой, результаты предшествующих тестовых испытаний.

Пусть амперметр A_3 – высокоточный, а амперметры A_1, A_2 одинаковы и показания их гораздо менее достоверны. Тогда составим систему уравнений для определения токов I_1, I_2 :

$$\| \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \| = \tilde{I}_3 \tag{11}$$

дополненная условием минимизации отклонения искомых решений I_1, I_2 от их экспериментально полученных значений \tilde{I}_1, \tilde{I}_2

$$(I_1 - \tilde{I}_1)^2 + (I_2 - \tilde{I}_2)^2 \rightarrow \min \tag{12}$$

Тогда искомые псевдорешения равны:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{I}_1 - \tilde{I}_2 + \tilde{I}_3 \\ -\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 + \tilde{I}_3 \end{pmatrix} \tag{13}$$

И $r_1 = -(\tilde{U}_1 + \tilde{U}_2)/I_1, r_2 = -(\tilde{U}_1 + \tilde{U}_2)/I_2$.

Пусть известны паспортные значения сопротивлений r_3, r_4 . Тогда недоопределенную систему уравнений

$$\| \begin{pmatrix} r_3 \\ r_4 \end{pmatrix} \| = \tilde{r} \tag{14}$$

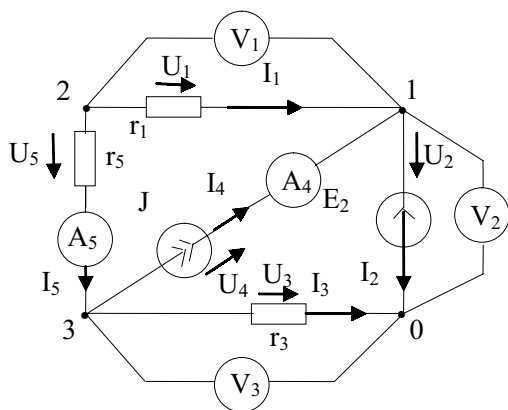


Рисунок 1. Электрическая схема

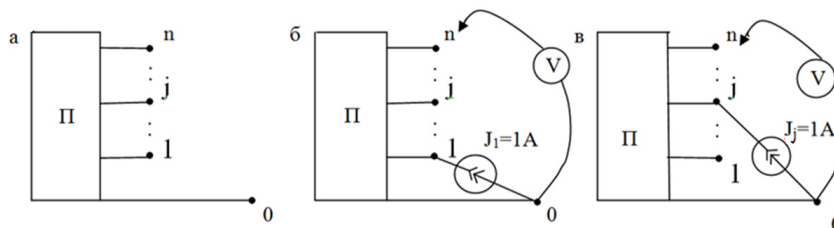


Рисунок 2. Многополюсник П(а) с включенным источником тока между узлами 0 и 1(б) и между 0 и j узлами(в)

где

$$\tilde{r}_3 = \frac{\tilde{U}_1}{\tilde{I}_3} \tag{15}$$

можно доопределить условием $(r_3 - \tilde{r}_3)^2 + (r_4 - \tilde{r}_4)^2 \rightarrow \min$, совместное решение которых дает:

$$r_3 = \frac{\tilde{r} + \tilde{r}_3 - \tilde{r}_4}{2}, \tag{16}$$

$$r_3 = \frac{\tilde{r} - \tilde{r}_3 + \tilde{r}_4}{2}. \tag{17}$$

Достоверность решения задач рассматриваемого типа зависит от объема и качества привлекаемой дополнительной информации, которая всегда есть у исследователя, главное — правильно ее формализовать [5].

Диагностика электрических цепей, обладающих жесткими математическими моделями

При диагностике цепей методом узловых сопротивлений могут возникать ситуации, когда решение является неустойчивым и сильно зависит от погрешности в измерениях узловых напряжений. Такие ситуации возникают, когда в цепи есть сечения, проходящие только по ветвям с проводимостью, малой по отношению к проводимостям остальных ветвей. Сечения, проходящие по ветвям с малой проводимостью, называются особыми. Наличие в цепи особых сечений приводит к так называемым плохо обусловленным математическим моделям цепи. Матрица плохо обусловлена, если малым изменениям параметров исходной матрицы соответствуют большие изменения в обратной матрице.

Для обусловленности матрицы А предложены различные количественные характеристики, называемые числами обусловленности, одним из них является число Тодда (спектральное число обусловленности):

$$\Theta = \frac{\max|\lambda_i(A)|}{\min|\lambda_i(A)|} \tag{18}$$

где λ_i — собственные значения матрицы А. Чем больше число обусловленности, тем менее устойчива система уравнений.

В общем случае в цепи возможно наличие нескольких особых сечений. При этом схема как бы разбивается на ряд подсхем, гальванически

слабо связанных между собой. Эти сечения могут быть вложенными друг в друга [7].

Каждое сечение, проходящее по ветвям с малой проводимостью, вносит в спектр матрицы узловых проводимостей Y цепи малое по модулю собственное значение. Соответственно, матрица $Z = Y^{-1}$ будет иметь m собственных значений, значительно превышающих по модулю остальные.

Рассмотрим влияние на погрешность определения элементов матрицы Y и, соответственно, погрешность решения задачи диагностики числа обусловленности И матрицы U узловых напряжений (матрицы Z узловых сопротивлений). Погрешность d_0 определяется как:

$$d_0 = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{Y_{ij} - Y_{ij}^{-1}}{Y_{ij}} \right)^2}, \tag{19}$$

где Y_{ij} — элементы «точной» матрицы Y, Y_{ij}^{-1} — элементы матрицы U^{-1} .

Прослеживается тенденция, что уже при $\lg \Theta > 4$ для задач первого порядка сложности и $\lg \Theta > 3$ для задач второго порядка сложности решение задачи диагностики невозможно, так как при определении элементов матрицы U с погрешностью D большие собственные значения матрицы U искажаются на величину порядка D и изменяются незначительно, в то время как изменение малых собственных значений на величину порядка D приводит к их значительным изменениям. Большие по модулю собственные значения матрицы Y определяются по сильно искаженным малым собственным значениям матрицы U, что сильно искажает сами элементы матрицы Y.

Большой вклад в разработку математического аппарата обработки жестких моделей внес Ю. В. Ракитский. Он доказал, что в жесткой системе уравнений между компонентами решения существуют линейные связи, и предложил общие алгоритмы определения этих связей, а так-

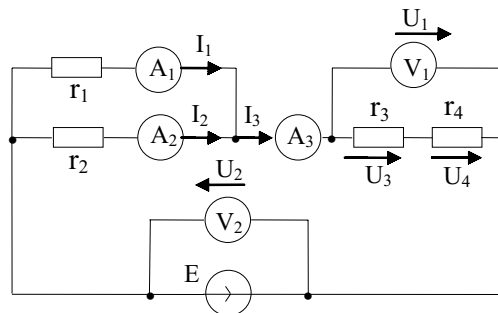


Рисунок 3. Электрическая цепь

же методы их использования для решения жестких задач. Ю.В. Ракитский сформулировал принцип повторных измерений (ППИ), применение которого к задачам диагностики электрических цепей позволяет определять параметры цепи с погрешностью, близкой к погрешности используемых измерительных приборов вне зависимости от жесткости математической модели [2].

Для диагностирования электрической цепи с использованием ППИ применяется следующий алгоритм:

1. Проводится первая серия экспериментов метода узловых сопротивлений, в результате которой определяется матрица узловых напряжений U . Если матрица U не полностью обусловлена или имеется априорная информация о наличии в диагностируемой цепи особых сечений, то непосредственное определение параметров матрицы узловых проводимостей Y по матрице U невозможно.

2. По матрице узловых напряжений U (матрице узловых сопротивлений Z) из уравнения:

$$U^s \cdot y_k = U^{s-1} \cdot J_k \quad (20)$$

определяется первая линейная связь, соответствующая максимальному собственному значению матрицы U . Погрешность определения коэффициентов линейной связи имеет тот же порядок, что и погрешность используемой измерительной аппаратуры и не зависит от обусловленности матрицы U .

3. Выполняется редукция исходной задачи, для чего один из узлов цепи, находящийся внутри особого сечения, соединяется с нулевым узлом, этим обеспечивается исключение особого сечения. Если информация об узлах, входящих в изолированную под схему, отсутствует, то она может быть получена в результате инспекции строк и столбцов матрицы U . Вычеркнем из матрицы U строку и столбец, соответствующие одному из узлов, и вычислим по полученной матрице $U_{(-1)}$ матрицу $Y_{(-1)}$. Узел входит в особое сечение, если норма матрицы $Y_{(-1)}$ существенно меньше нормы матрицы Y , в противном случае нормы этих матриц близки.

4. Проводится вторая серия экспериментов метода узловых сопротивлений в цепи с закороченным узлом. Так как редуцированная задача содержит на одно особое сечение меньше, то порядок ее сложности понижен на единицу. В результате серии повторных экспериментов определяется матрица U_1 .

5. Проверяется степень обусловленности I_{U_1} матрицы узловых напряжений U_1 цепи с закороченным узлом, размерность которой на единицу меньше размерности U . Если $I_{U_1} \gg 1$, то определяется вторая линейная связь, повторяются пункты 3, 4 настоящего алгоритма и определяется матрица U_2 , размерность которой на единицу меньше размерности U_1 , и т. д. Если значение обусловленности I_{U_1} приемлемо при заданном уровне погрешности измерений, то обращением матрицы U_1 определяется матрица Y_1 узловых проводимостей цепи с закороченным узлом. При этом определяются проводимости всех ветвей исходной цепи, за исключением ветвей, инцидентных закороченному узлу. Проводимости этих ветвей определяются с помощью линейной связи.

Применение описанного алгоритма позволяет снизить погрешность определения элементов матрицы узловых проводимостей до уровня погрешности измерений, независимо от степени обусловленности задачи. Применение ППИ при решении задачи диагностики целесообразно уже при $I > 102$. Уже при $I > 103,5$ применение ППИ позволяет более чем в 100 раз уменьшить погрешность решения задачи диагностики [2].

Погрешность решения задачи диагностики практически не зависит от обусловленности матрицы Y , а среднее значение погрешности близко к максимально достижимому уровню – уровню погрешности измерительных приборов. Однако применение ППИ для диагностики цепей первого порядка сложности требует удвоенного в сравнении с применением стандартного метода узловых сопротивлений объема экспериментальной работы, а при диагностировании цепей второго порядка сложности утроенного объема работы [5], [6].

Для диагностики линейных цепей переменного тока также целесообразно применять ППИ уже при $I > 1$, то есть практически для всех задач. Все результаты справедливы также для диагностики линейных цепей переменного тока при использовании комплексного метода. Особые сечения в таких цепях возникают на частотах, близких к резонансным. Альтернативой применения ППИ является выполнение экспериментов на различных частотах. Но выполнение опытов на одной частоте предпочтительно из-за наличием большого числа индуктивно-емкостных связей, кроме того свойства математических моделей устройств могут значительно

но изменяться при изменении частоты, особенно для высокочастотных устройств.

Анализ существующих методов диагностики электрических цепей показал:

- наиболее рациональным методом диагностирования электрических цепей является метод, основанный на принципе повторных измерений;
- при проведении диагностирования суще-

ствует возможность выполнения экспериментов на различной частоте питающего напряжения;

- возможно диагностирование линейных цепей переменного тока в сочетании с комплексным методом расчета;
- определение параметров цепи происходит вне зависимости от жесткости математической модели.

11.09.2013

Список литературы:

1. Панкин А.М., Башарин С.А. Качественное определение информативности измерений в резистивной цепи при диагностировании параметров ее элементов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество» / Пенза, 2000. – С.310.
2. Демирчян К.С. Проблемы диагностики электрических цепей // Диагностика и специальные методы анализа электрических цепей: Труды ДВПИ. – Владивосток: ДВПИ, 1975. – Т. 105. – С. 3-6.
3. Трубникова В. Н. Электротехника и электроника. В 2.ч. – Оренбург: ОГУ, 2011. – 12 с.
4. Быковская, Л.В. Математическая модель точности показателей качества серийно выпускаемого асинхронного двигателя. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Л. В. Быковская; рук. Н. Г. Никиян. – Оренбург: ОГУ, 1999. – 125 с. + табл.
5. Киншт Н.В., Герасимова Г.Н, Кац М.А. Диагностика электрических цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.
6. Быковская, Л.В. Методы исследования дифференцирующих и интегрирующих электрических цепей / Л.В. Быковская, Д.Р. Каримов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. – №9. – С.
7. Бутырин П.А., Васьковская Т.А. Диагностика сложных электрических цепей по частям // Изв. РАН Энергетика. – 2000. – №2. – С. 136-137.
8. Ушакова, Н. Ю., Быковская Л.В. Анализ линейных электрических цепей в стационарных и переходных режимах. – М.: ООО «ТиРу», 2012. – 134 с.: рис. – Библиогр.: с. 133. – ISBN 978-5-93883-212-1.
9. Васьковская Т.А. Диагностика сложных резистивных цепей по частям // Шестая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. В 3-х т. – М., МЭИ, 2000. – т. 3.1. С. 278, 279.

Сведения об авторах:

Быковская Людмила Владимировна, доцент кафедры теоретической и общей электротехники электроэнергетического факультета Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент

Андриянова Юлия Игоревна, студент электроэнергетического факультета Оренбургского государственного университета, e-mail: ulia.andrianowa@mail.ru

Цейтер Екатерина Владимировна, студент электроэнергетического факультета Оренбургского государственного университета, e-mail: ekaterina93tseiter@mail.ru
460000, г.Оренбург, Шарлыкское шоссе, 5, тел. (3532) 372880, e-mail: toe@unpk.osu.ru

UDC 621.37

Bykovskaya L.V., Andriyanova J.I., Tseiter E.V.

Orenburg state university, e-mail: toe@unpk.osu.ru

DIAGNOSTICS OF ELECTRIC CHAINS

The main methods which are used for electric chains' diagnostics are analyzed. The electric chains' diagnostics is the most important and intensively developed in parts of electrical engineering. The main advantages and disadvantages are analyzed and the most relevant are revealed.

Key words: diagnostics, electric chain, the host resistance's method, rigid model, data inconsistency, passive and active chains, inaccuracy.

Bibliography:

1. Pankin A.M. Basharin S. A. High-quality determination of informational content of measurements in a resistive chain when diagnosing parameters of its elements//Works of the International symposium «Reliability and quality» / Penza, 2000. – p. 310.
2. Demirchyan C.S. Problems of electrical chains' diagnostics // Diagnostics and special methods of electrical chains' analysis: FENTU's works. – Vladivostok: FENTU, 1975. – V. 105. – pp. 3-6.
3. Trubnikova V. N. Electrical equipment and electronics. In 2.p. – Orenburg: OSU, 2011. – 12 p.
4. Bykovskaya, L.V. The mathematical model of accuracy of indicators of quality serially let out asynchronous motors. Dissertation on competition of a scientific degree of Candidate of Technical Sciences/L.V. Bykovskaya; hands. N. G. Nikiyan. – Orenburg: OSU, 1999. – 125 p.
5. Kinsht N.V., Gerasimova G.N., Kats M.A. Diagnostics of electric chains.– М.: Energoatomizdat, 1983. – 192 p.
6. Bykovsky, L.V. The research methods of differentiating and integrating circuits / L.V. Bykovsky, D.R. Karimov//Messenger of the Orenburg state university. – 2013. – №9. – P.
7. Butyrin P.A., Vaskovskaya T.A. Composite electric chain's diagnostics by parts //RAS Energy. – 2000. – №2. – pp. 136-137
8. Ushakova, N. Y., Bykovskaya L.V. Analiz of linear electric chains in stationary and transitional modes. – М.: JSC Tiru, 2012. – 134 p: fig. – ISBN 978-5-93883-212-1.
9. Vaskovskaya T.A. Diagnostics of composite resistive chains by parts // The sixth international scientific and technical students and graduate students' conference: Reports' theses. In 3 vol. – М., MPEI, 2000. – vol. 3.1. pp. 278, 279.