

УДК 681.518.5  
ББК 32.817

## **ОБ ОДНОМ ВАРИАНТЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**Дубов А. В.<sup>1</sup>, Капранов А. П.<sup>2</sup>, Сускин В. В.<sup>3</sup>,  
Шевченко В. Ф.<sup>4</sup>**

*(Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет», Рязань)*

*Предложены принципы построения системы технического диагностирования радиоэлектронных устройств, включающей в себя базу данных, методы абстрактного анализа, моделирования поведения исследуемого устройства и распознавания образов сигналов с использованием преобразования Фурье.*

Ключевые слова: техническая диагностика, анализ, радиоэлектронные устройства, функциональные элементы.

### **1. Введение**

Современные средства вычислительной техники и программного обеспечения дают возможность применять интеллектуальные системы поддержки принятия решений, методы абстрактного и модельного описания и исследования, а также алгоритмы распознавания образов, для целей автоматизации процесса принятия диагностических решений. Использование таких подходов позволяет решить ряд проблем, возникающих

---

<sup>1</sup> Антон Владимирович Дубов, аспирант, ([dubovanton@mail.ru](mailto:dubovanton@mail.ru)).

<sup>2</sup> Александр Павлович Капранов, аспирант, ([sierra-leone@mail.ru](mailto:sierra-leone@mail.ru)).

<sup>3</sup> Виктор Васильевич Сускин, доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой.

<sup>4</sup> Виктор Федорович Шевченко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой.

при автоматизации диагностирования, преодоление которых традиционными средствами было затруднительно в силу объективных и субъективных факторов. К таким задачам относится определение электрорадиоэлемента, явившегося причиной отказа вышедшего из строя аналогового устройства.

Для цифровых схем описано много алгоритмов построения диагностических последовательностей. Это в первую очередь связано с относительно легкой формализацией и описанием функционирования логических элементов с использованием понятий булевой алгебры. Для аналоговой же техники описание ее функционирования несут системы дифференциальных уравнений, решение которых гораздо сложнее. К тому же более сложной становится интерпретация полученных результатов: значения сигналов здесь являются непрерывными и протяженными во времени. Поэтому решению вопросов автоматизации диагностики аналоговых приборов уделяется гораздо меньшее внимание, хотя их доля в реальных устройствах велика.

Особенностью существующих решений является применение ручных способов диагностики отказов аналоговой техники, когда эксперт с использованием функциональных и электрических схем с нанесенными эпюрами сигналов в контрольных точках, прослеживая прохождение сигнала, делает заключение о неисправном элементе. Такой подход требует присутствия высококвалифицированного специалиста в месте ремонта, наличия большого объема технической документации, которая часто плохо структурирована и представлена в неудобной для транспортировки форме, и значительного времени на процесс диагностики. Применение автоматизации в процессе диагностирования служит для снижения трудоемкости и времени выдвижения гипотезы о возникшей неисправности и повышения вероятности верного нахождения неисправного элемента.

В данной работе предлагается вариант построения системы технического диагностирования радиоэлектронных устройств (СТДРУ), сочетающий в себе указанные выше составляющие интеллектуальных систем, подходы системного анализа и теории принятия решений, с целью снижения трудоемкости и повышения вероятности нахождения неисправного элемента.

## 2. Основные подходы к построению СТДРУ

Наиболее перспективным вариантом построения систем диагностирования (СД) уже существующих устройств является программно-аппаратный способ [4]. При его реализации (рис. 1) данные с диагностируемого устройства (ДУ) поступают через шину данных (ШД) на адаптер (А), который преобразует их в информацию, поступающую в персональный компьютер (ПК) по стандартному интерфейсу (СИ), например, *USB* или *LPT*, для дальнейшей алгоритмической обработки.

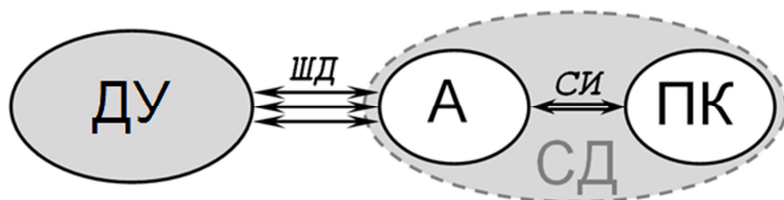


Рис. 1. Программно-аппаратный вариант реализации систем диагностирования

Как показано в [2], для решения вопросов автоматизации процесса технического диагностирования аналоговых устройств с применением СТДРУ наиболее подходит математическое мысленное детерминированное и стохастическое моделирование, использующее имитационные модели схем электрических принципиальных и элементов электроники (этап моделирования). Но в связи с большими размерами большинства реальных устройств для ускорения процесса диагностирования целесообразно как можно более сокращать схему электрическую принципиальную устройства, подлежащую моделированию, за счет ее декомпозиции. Поэтому, как отмечается в [5], любое ДУ, для возможности диагностики его технического состояния, должно быть разбиваемо на понятные в описании функциональные элементы (ФЭ) большей или меньшей сложности. При этом ФЭ большей сложности могут, в свою очередь, расчленяться на более простые и т.д. Обычно ФЭ представляют собой самостоятельные устройства, обеспечивающие решение некоторых

частных задач. Рассмотрение ДУ как связанных между собой ФЭ осуществляется на этапе абстрактного исследования.

В литературе по вопросам диагностики [1, 3] широкое внимание уделяется такому режиму локализации неисправностей как параллельный (или комбинационный) поиск, существенным недостатком которого является необходимость контроля всех задействованных выходов ФЭ. К тому же ФЭ здесь задается как блок, имеющий в общем виде несколько входов и один выход, что при выделении в реальных устройствах бывает недостаточным: приходится модель реального ФЭ задавать несколькими блоками по количеству выходов.

В данной работе предлагается представлять ФЭ как модель, имеющую в общем виде несколько входов и несколько выходов, а описываемый алгоритм позволяет в подавляющем большинстве случаев осуществлять контроль не всей совокупности выходов ФЭ.

## 2.1. ОПИСАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АБСТРАКТНОЙ МОДЕЛИ ДУ

В предлагаемом варианте построения СТДРУ  $i$ -й ФЭ представляется в виде ориентированного графа причинно-следственных связей  $FE_i(W_i^{FE}, Q_i^{FE})$ , где  $W_i^{FE}$  – множество вершин графа  $FE_i$ , а  $Q_i^{FE}$  – отображение  $W_i^{FE}$  в  $W_i^{FE}$ .

Для ФЭ граф причинно-следственных связей устанавливает влияние какого-либо сигнала на входе ФЭ на формирование какого-либо сигнала на выходе ФЭ. Таким образом, «причина» – сигнал на входе ФЭ, а «следствие» – его влияние на формирование сигнала на выходе ФЭ. В ФЭ всякая причинно-следственная связь реализуется в виде электрических соединений, но с их рассмотрением в виде «путей» распространения сигналов (ориентированных связей, имеющих направление).

Множество вершин графа  $i$ -го ФЭ определим как  $W_i^{FE} = \{X_i, Y_i\}$ , где  $X_i = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i\}$  – совокупность входов  $FE_i$ ;  $Y_i = \{y_1^i, y_2^i, \dots, y_m^i\}$  – совокупность выходов  $FE_i$ .

Матрица влияний входов  $i$ -го ФЭ на его выходы ( $A_i$ ) будет иметь следующий вид:

$$A_i = \begin{matrix} & y_1^i & \dots & y_m^i \\ x_1^i & (a_1^1 & \dots & a_1^m) \\ \vdots & (\vdots & \ddots & \vdots) \\ x_n^i & (a_n^1 & \dots & a_n^m) \end{matrix},$$

$$\text{где } a_i^j = \begin{cases} 1, & \text{если сигнал входа } x_i^i \text{ влияет} \\ & \text{на формирование сигнала на выходе } y_j^i; \\ 0, & \text{если сигнал входа } x_i^i \text{ не влияет} \\ & \text{на формирование сигнала на выходе } y_j^i. \end{cases}$$

ДУ, состоящее из  $N$  ФЭ, задается в виде ориентированного графа  $DU(W^{DU}, Q^{DU})$ , где  $W^{DU}$  – множество вершин графа диагностируемого устройства;  $Q^{DU}$  – отображение  $W^{DU}$  в  $W^{DU}$ .

Множество вершин графа ДУ определим как  $W^{DU} = \{X_0, W^{FE}, Y_0\}$ , где  $X_0 = \{x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0\}$  – совокупность входов ДУ;  $W^{FE} = \{W_1^{FE}, W_2^{FE}, \dots, W_N^{FE}\}$  – совокупность вершин функциональных элементов, составляющих устройство;  $Y_0 = \{y_1^0, y_2^0, \dots, y_p^0\}$  – совокупность выходов ДУ.

На основании вышесказанного определим матрицу логических связей устройства как квадратную матрицу смежности  $B$ , состоящую из подматриц:

$$B = \begin{matrix} & X_0 & W_1^{FE} & W_2^{FE} & \dots & W_N^{FE} & Y_0 \\ X_0 & \left( \begin{matrix} 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & C_1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & C_2 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & C_N & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{matrix} \right) \\ W_1^{FE} & & & & & & \\ W_2^{FE} & & & & & & \\ \dots & & & & & & \\ W_N^{FE} & & & & & & \\ Y_0 & & & & & & \end{matrix}.$$

Здесь на главной диагонали находятся матрицы смежностей соответствующих ФЭ ( $C_1, \dots, C_N$ ), за исключением нулевых матриц влияния входов и выходов ДУ на самих себя. На месте « $\dots$ » находятся подматрицы влияния соответственно входов и выходов ДУ и ФЭ друг на друга.

Данное описание предполагает, что связи между разными ФЭ в ДУ всегда исправны. Если есть необходимость в проверке связей между ФЭ на отказ, то их необходимо задавать как отдельные ФЭ.

Весом вершины  $s \in W^{DU}$  по выходу  $k \in Y_0$  будем называть число  $V_s^k$ , характеризующее значимость проверки вершины  $s$  при отказе устройства по выходу  $k$ .

Логической оценкой  $O_s^k$  вершины  $s \in W^{DU}$  по выходу  $k \in Y_0$  будем называть булеву переменную, причем

$$O_s^k = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } s \text{ является вершиной,} \\ & \text{приводящей к нормальной работе выхода } k; \\ 0, & \text{если вершина } s \text{ является вершиной,} \\ & \text{приводящей к отказу на выходе } k. \end{cases}$$

Функция  $F_s$  условия необходимости проверки выхода  $s$  элемента  $FE_i$  представляет собой дизъюнкцию логических оценок по этому выходу ФЭ выходов ДУ  $O_s^{l^*}, \dots, O_s^{l^{**}}$ , по которым имеется отказ, и всех выходов ДУ с оценками  $O_s^{k^*}, \dots, O_s^{k^{**}}$ , у которых значение выхода лежит в рамках допуска. А именно:

$$F_s = (O_s^{l^*} + \dots + O_s^{l^{**}}) + (O_s^{k^*} + \dots + O_s^{k^{**}}).$$

Пусть все входы и выходы ДУ доступны для наблюдений и измерений. Тогда, описав таким образом модель ДУ, можно определить последовательность проверки функциональных элементов для устройств без обратных связей, используя следующий эвристический алгоритм взвешивания:

0. Присваиваем всем весам  $V_s^k$  значение 0.
1. Отмечаем строку в матрице  $B$ , соответствующую исследуемому выходу из множества  $Y_0$ .
2. Вспомогательной переменной  $M$  присваиваем значение 1.
3. Выбираем столбцы в матрице  $B$ , одноименные последним отмеченным строкам, и присваиваем их весам  $V_s^k$  значение  $M$ .
4. Отмечаем все строки, значения матрицы  $B$  которых в выбранных столбцах равны «1».
5. Увеличиваем значение  $M$  на 1.
6. Если есть отмеченные строки из множеств  $X_0$  и (или)  $W^{FE}$ , то переходим к п. 3. Если таковых нет, то переходим к п. 7.
7. Конец выполнения алгоритма.

Проведем взвешивание по вышеописанному алгоритму для выходов ДУ, по которым имеется отказ. Присвоим логическим оценкам  $O_s^k$ , для которых  $V_s^k > 0$ , логический «0», указывающий на то, что в отмеченных вершинах возможен отказ. Аналогично проведем исследование для выходов ДУ, для которых значение выхода лежит в рамках допуска. Присвоим оценкам  $O_s^k$ , для которых  $V_s^k > 0$ , логическую «1», указывающую на то, что в отмеченных вершинах отказа нет.

Вычислив значения функции  $F_s$  для всех выходов ФЭ определяем необходимость проверки того или иного выхода. Если  $F_s = 1$ , то при формировании сигнала хотя бы одного из выводов ДУ выходывыдал штатный отклик, а, следовательно, не нуждается в проверке. Если же значение  $F_s = 0$ , то выход  $s$  требует проверки. Это позволяет сузить совокупность выходов ФЭ, подлежащих проверке. Причем их рассмотрение следует производить, начиная с элементов с максимальным значением  $V_s^k$ .

Рассмотрим реализацию вышеописанной модели и алгоритма на примере устройства суммирования и выдачи сигналов специальной формы (его модель приведена на рис. 2).

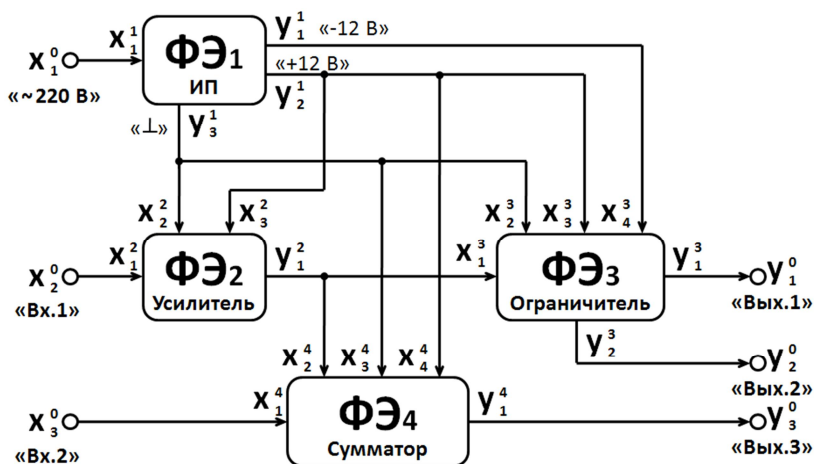


Рис. 2. Модель описания устройства суммирования и выдачи сигналов специальной формы

Данное устройство может быть функционально разбито на следующие ФЭ: источник питания, усилитель ограничитель и сумматор. Соответствующие им логические модели, аналитические зависимости, графы причинно-следственных связей и характеризующие их матрицы смежности приведены на рис. 3.

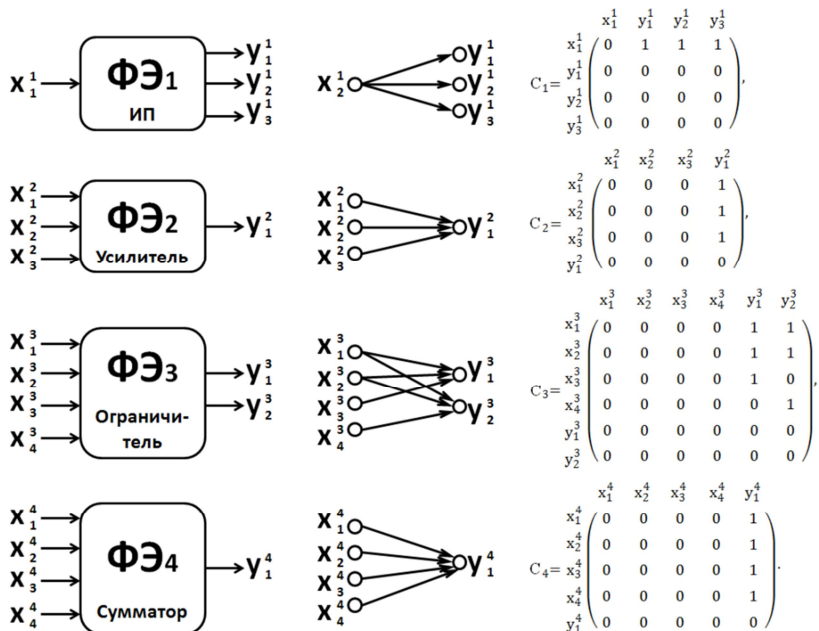


Рис. 3. Описание ФЭ

Граф причинно-следственных связей устройства приведен на рис. 4.

По графу, представленному на рис. 4, строим матрицу смежности  $B$  исследуемого устройства (рис. 5).

Опишем в качестве примера работу алгоритма взвешивания для выхода  $y_1^0$  ДУ. Отмечаем строку  $y_1^0$  в матрице  $B$ .  $M = 1$ . Выбираем столбец  $y_1^0$ .  $V_{y_1^0}^1 = 1$ . Отмечаем строку  $y_1^3$ .  $M = 2$ . Выбираем столбец  $y_1^3$ .  $V_{y_1^3}^2 = 2$ . Отмечаем строки  $x_1^3, x_2^3, x_3^3$ .  $M = 3$ .





Выбираем столбцы  $x_1^3, x_2^3, x_3^3$ .  $V_{x_1^3}^{y_1^0}=3, V_{x_2^3}^{y_1^0}=3, V_{x_3^3}^{y_1^0}=3$ . Отмечаем строки  $y_1^2, y_3^1, y_2^1$ .  $M=4$ . Выбираем столбцы  $y_1^2, y_3^1, y_2^1$ .  $V_{y_1^2}^{y_1^0}=4, V_{y_3^1}^{y_1^0}=4, V_{y_2^1}^{y_1^0}=4$ . Отмечаем строки  $x_1^2, x_2^2, x_3^2, x_1^1$ .  $M=5$ . Выбираем столбцы  $x_1^2, x_2^2, x_3^2, x_1^1$ .  $V_{x_1^2}^{y_1^0}=5, V_{x_2^2}^{y_1^0}=5, V_{x_3^2}^{y_1^0}=5, V_{x_1^1}^{y_1^0}=5$ . Отмечаем строки  $x_2^0, y_3^1, y_2^1, x_1^0$ .  $M=6$ . Выбираем столбцы  $x_2^0, y_3^1, y_2^1, x_1^0$ .  $V_{x_2^0}^{y_1^0}=6, V_{y_3^1}^{y_1^0}=6, V_{y_2^1}^{y_1^0}=6, V_{x_1^0}^{y_1^0}=6$ . Отмечаем строку  $x_1^1$ .  $M=7$ . Выбираем столбец  $x_1^1$ .  $V_{x_1^1}^{y_1^0}=7$ . Отмечаем строку  $x_1^0$ .  $M=8$ . Выбираем столбец  $x_1^0$ .  $V_{x_1^0}^{y_1^0}=8$ .  $M=9$ . Конец выполнения алгоритма.

Результат выполнения алгоритма взвешивания для устройства суммирования и выдачи сигналов специальной формы по каждому из выходов приведен над его матрицей смежности  $B$ . Здесь каждая строка содержит веса  $V$  для соответствующей вершины графа ДУ.

Так, если отказ произошел по выходу  $y_2^0$ , а по выходам  $y_1^0$  и  $y_3^0$  – штатные отклики, то функции условия необходимости проверки выходов элементов будут иметь значения

$$\begin{aligned}
 F_{y_1^1} &= O_{y_1^1}^{y_2^0} = 0, \\
 F_{y_2^1} &= O_{y_2^1}^{y_2^0} + \left( O_{y_2^1}^{y_1^0} + O_{y_2^1}^{y_3^0} \right) = 0 + (1+1) = 1, \\
 F_{y_3^1} &= O_{y_3^1}^{y_2^0} + \left( O_{y_3^1}^{y_1^0} + O_{y_3^1}^{y_3^0} \right) = 0 + (1+1) = 1, \\
 F_{y_1^2} &= O_{y_1^2}^{y_2^0} + \left( O_{y_1^2}^{y_1^0} + O_{y_1^2}^{y_3^0} \right) = 0 + (1+1) = 1, \\
 F_{y_1^3} &= O_{y_1^3}^{y_1^0} = 1, \\
 F_{y_2^3} &= O_{y_2^3}^{y_2^0} = 0, \\
 F_{y_1^4} &= O_{y_1^4}^{y_3^0} = 1.
 \end{aligned}$$

Так как  $V_{y_1^1}^{y_2^0} = 4$ , а  $V_{y_2^3}^{y_2^0} = 2$ , то неисправность надо искать сначала в формировании выхода  $y_1^1$ , а затем  $y_2^3$ .

Таким образом, на этапе абстрактного исследования производится сужение области рассмотрения выходов ФЭ и определяется порядок проведения проверок выходов ФЭ из числа предположительно отказавших: формируется жесткая программа последовательного поиска неисправностей, которая подразумевает в подавляющем большинстве случаев контроль только части выходов функциональных элементов реального устройства. В данное число предположительно отказавших выходов ФЭ попадают как все одиночные, так и всевозможные комбинации одновременных отказов.

## 2.2. РЕАЛИЗАЦИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФЭ

Для обеспечения действия автоматизированного интерактивного алгоритма поиска неисправности методом моделирования поведения устройства, находящегося в исправном и неисправном состояниях, необходимо, задавая возможные варианты неисправностей ЭРЭ, производить моделирование электрической схемы ФЭ, получать расчетные выходные характеристики сигналов и по результатам сравнения их с откликами реального устройства делать либо вывод о штатном режиме работы, либо предположение о выходе из строя того или иного элемента схемы. Большинство программных продуктов на российском рынке позволяют делать лишь некоторые из перечисленных выше шагов. *Micro-Cap* позволяет моделировать схему, но не имеет возможности алгоритмического изменения параметров схемы и выдачи логических выводов. В свою очередь, многие пакеты текстового программирования позволяют реализовывать процессы задания условий и обработки результатов измерений, но при этом в них не предусмотрены функции моделирования поведения устройств.

Все необходимые функции – интерактивное задание параметров моделей ЭРЭ и входных сигналов, моделирование поведения электрической схемы ФЭ – могут быть выполнены в пакете *MATLAB*. Имеющийся внутренний язык программирования позволяет интерактивно задавать изменения параметров

элементов схемы. Прикладная программа *Simulink* с библиотекой блоков *SimPowerSystems* позволяют провести моделирование исследуемой схемы. Библиотека *SimPowerSystems* достаточно обширна. В том случае, если все же нужного блока в библиотеке нет, пользователь имеет возможность создать свой собственный блок как с помощью уже имеющихся в библиотеке блоков, реализуя возможности *Simulink* по созданию подсистем, так и на основе блоков основной библиотеки *Simulink* и управляемых источников тока или напряжения.

Для возможности проведения моделирования схема электрическая принципиальная анализируемого устройства должна быть задана в среде *Simulink* в виде структуры, приведенной на рис. 6.

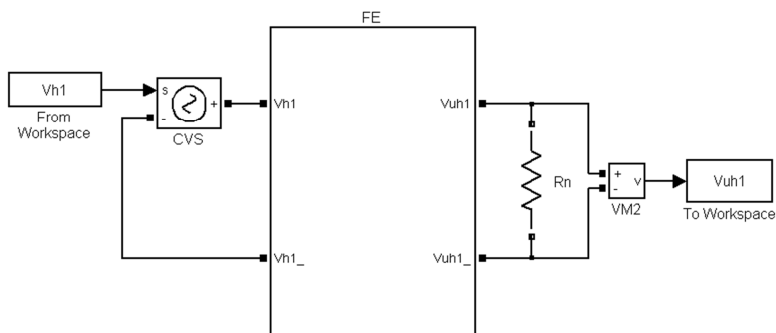


Рис. 6. Реализация общей модели ФЭ в Simulink

На рис. 6 сопротивление резистора  $R_n$  соответствует входному сопротивлению измерительного устройства.

Сама схема электрическая принципиальная задается в виде подсистемы (*FE*), в которой в свою очередь подсистемами могут задаваться модели сложных составных элементов, а также сами модели функционирования ЭРЭ (рис. 7, 8).

Схожесть сигналов проверяется программными средствами при помощи алгоритмов на основании заложенных критериев оценки. Для повышения чувствительности, а, следовательно, и точности сравнения, используется переход из временной области рассмотрения сигналов в частотную область (получение

спектров сигналов, используя дискретное преобразование Фурье) и дальнейшее определение эквивалентности спектров исследуемых сигналов с помощью вычисления критериев схожести.

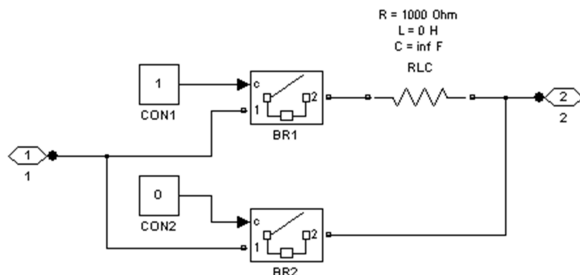


Рис. 7. Пример реализации модели функционирования резистора

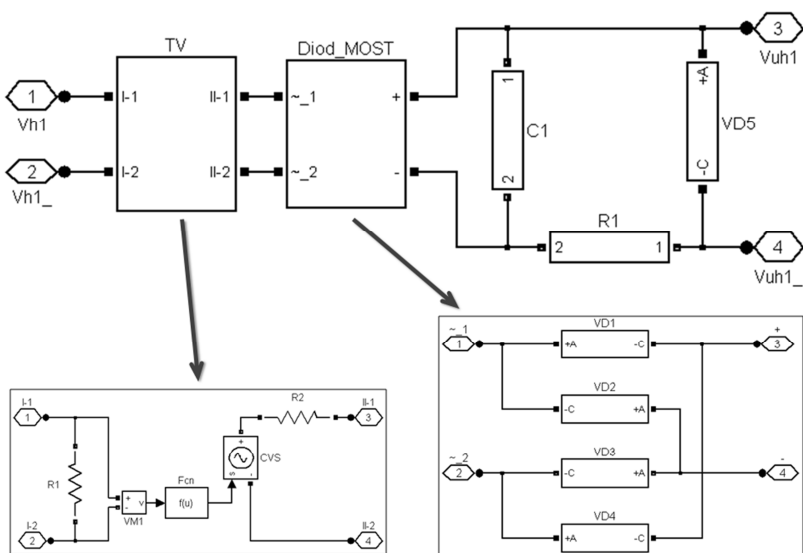


Рис. 8. Реализация аналитической модели ФЭ в Simulink

### 3. Заключение

В данной статье рассматривается один из вариантов решения технического диагностирования радиоэлектронных устройств. Предлагается описание базы данных ФЭ, которая совмещает в себе абстрактную модель, аналитическую модель и модели диагностируемых неисправностей ЭРЭ. Благодаря такому описанию ФЭ достигается его высокая унификация при применении в любом месте схемы ДУ. Разработанные алгоритмы абстрактного исследования ДУ, подходы к моделированию поведения исследуемого ФЭ и поиска неисправных компонентов позволяют формализовать и автоматизировать процесс диагностики аналоговых приборов, сделать его более достоверным, полным и мобильным без временных задержек принятия решений даже низко квалифицированным специалистом.

Работа выполнена в рамках договора с ОАО Завод «Красное знамя», г. Рязань. Применение методов и подходов, приведенных в статье, позволило снизить трудоемкость поиска неисправности на 30% и повысить достоверность нахождения неисправного компонента на 25% по сравнению с ранее использованными на предприятии вариантами выявления отказа.

### Литература

1. ВЕРЗАКОВ Г.Ф. и др. *Введение в техническую диагностику*. – М.: «Энергия», 1968.
2. ДУБОВ А.В. *Автоматизация технического диагностирования аналоговых устройств*// Молодой ученый. – 2010. – №5. – С. 47–51.
3. *Основы технической диагностики. Кн. I. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза* / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: «Энергия», 1976. – 464 с.
4. СЕРДАКОВ А.С. *Автоматический контроль и техническая диагностика*. – Киев: «Техніка», 1971. – 244 с.
5. СУСКИН В.В., ДУБОВ А.В., КАПРАНОВ А.П. *Обзор современных средств автоматизации поиска неисправностей в электронных устройствах*// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – №2. – С. 54–59.

## **ON A SOLUTION OF RADIO-ELECTRONIC DEVICES TECHNICAL DIAGNOSTICS PROBLEM**

**Anton Dubov**, the post-graduate student, (dubovanton@mail.ru).

**Alexander Kapranov**, the post-graduate student, (sierraleone@mail.ru).

**Victor Suskin**, Dr.Sci.Tech., the professor, the assistant manager-chair.

**Victor Shevchenko**, Dr.Sci.Tech., the professor, the managing chair.

*Abstract: Principles are suggested for design of the system for radio-electronic devices technical diagnostics. The system includes the database, the methods of: abstract analysis, device functioning simulation, and Fourier-transformation-based signals recognition.*

**Keywords:** technical diagnostics, analysis, radio-electronic devices, functional elements.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии М. Ф. Караваем*