

УДК 537.2.001.24

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ИМПУЛЬСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ ВХОДНОЙ ЦЕПИ С ЗАЩИТНЫМ ПОЗИСТОРОМ МОДУЛЯ ПРИЕМА ДАННЫХ

Рассматриваются электромагнитные процессы, возникающие в снабженной защитным подавителем помех – позистором активно-индуктивной входной цепи приема данных при воздействии биэкспоненциального импульса помехи. Анализ осуществляется на основании правила Петерсона – Пффистера и метода кусочно-линейной аппроксимации. При анализе результатов расчетов установлена зависимость хода импульсных процессов в цепи и подавления помех от параметров элементов схемы. Обоснована необходимость математического моделирования работы схем с защитными элементами-позисторами при проектировании аппаратуры критически важных информационных систем.

Успешная работа и дальнейшее развитие Белорусской железной дороги на современном этапе требует обеспечения высокого уровня безопасности перевозочного процесса. Выполнить это возможно только путем внедрения микропроцессорных и микроэлектронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ). Эти системы относятся к классу критически важных информационных систем, к которым предъявляются особо высокие требования по функциональной безопасности и электромагнитной совместимости, зафиксированные в нормативной документации. Чтобы указанные системы удовлетворяли критериям помехоустойчивости и помехозащищенности, микропроцессорная и микроэлектронная аппаратура сигнализации, централизации и блокировки снабжается различными средствами защиты, в том числе подавителями кондуктивных широкополосных импульсных помех (СШИП). Одним из видов таких помех является электростатический разряд (ЭСР). Он достаточно широко распространен, способен вызвать неожиданные и труднообъяснимые сбои в работе СЖАТ и сходен по свойствам импульса и механизмам воздействия с другими видами СШИП. Поэтому изучение работы схем-подавителей помех оказывается актуальным для проектирования аппаратуры различных СЖАТ.

В настоящее время специально для подавления ЭСР разработаны позисторы, которые включаются последовательно с защищаемой нагрузкой [1]. Хотя данное техническое решение применяется достаточно часто, ни в отечественной [1, 2], ни в зарубежной [3, 4] литературе не описаны методы расчета цепей с защитными позисторами. В монографии [5], посвященной переходным процессам в цепях с термисторами, рассмотрены переходные процессы в простейшей последовательной RL -цепи с термистором, и источником постоянного напряжения. Также выведены передаточные функции термистора при воздействии на него потоков прямоугольных импульсов и импульсов включения, возникающих при работе датчиков с импульсной модуляцией сигнала. Следовательно, эти результаты недостаточны для анализа воздействия импульсных помех. Кроме того, к моменту выхода книги [5] тепловая инерционность термисторов была очень велика, что не позволяло использовать их в цепях защиты от быстропротекающих помех, но требовало учета этой инерционности при анализе переходных процессов. Современные модели позисторов-подавителей имеют малую тепловую

инерционность, следовательно, необходимо внести изменения и в методы расчета переходных процессов. Таким образом, задачей настоящей статьи является разработка методов расчета переходных процессов в цепи рецептора помех, снабженной защитным позистором, и исследование протекания этих процессов в зависимости от параметров этой цепи.

Для анализа переходных процессов используется схема замещения входной цепи приемника данных, подключенной к линии передачи данных (рисунок 1). Входная цепь включает в себя последовательно включенные позистор НЭ, омическое сопротивление нагрузки R_n , индуктивность L проводника между входным контактом приемника и линией связи. Линия передачи данных рассматривается как линия без потерь с не зависящим от частоты сигнала волновым сопротивлением z [6, 7].

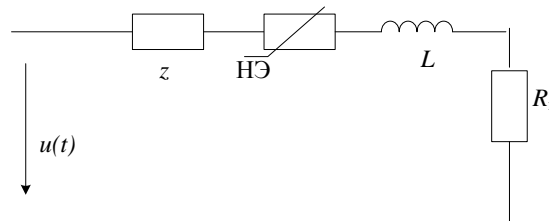


Рисунок 1 – Схема замещения входной цепи приемника данных

Согласно [8] принцип действия позистора заключается в том, что при достаточном нагреве протекающим током омическое сопротивление элемента резко возрастает на три порядка, что приводит к ограничению помехового тока. Ампер-вольтная характеристика позистора показана на рисунке 2, а зависимость омического сопротивления позистора от его температуры – на рисунке 3 [8].

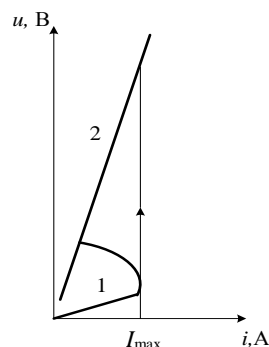


Рисунок 2 – Ампер-вольтная характеристика позистора

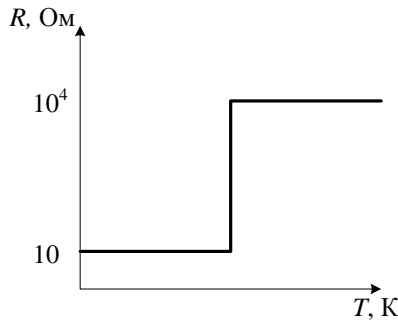


Рисунок 3 – Зависимость омического сопротивления позистора от его температуры

Ампер-вольтная характеристика позистора может быть описана выражением

$$\begin{cases} 0 \leq i \leq I_{\max} & i = \frac{u}{R_{п1}} \\ i > I_{\max} & i = \frac{u}{R_{п2}} \end{cases}, \quad (1)$$

где $R_{п1}$, $R_{п2}$ – омические сопротивления позистора на участках характеристики 1 и 2 соответственно.

Для расчета переходных процессов в линии с нелинейной нагрузкой применяется метод характеристик [6, 7]. Но к тем же расчетным выражениям приводит и метод Петерсона-Пффистера [9]. Выражение (1) показывает, что расчет процессов в нагрузке линии передачи данных по правилу Петерсона – Пффистера можно осуществить методом кусочно-линейной аппроксимации [5]. Для оценки работы подавителя рассматривается поступление в нагрузку первого (исходного) импульса помех, а последующие отражения импульса от нагрузки не рассчитываются.

Принимается, что в линию поступил импульс помехового напряжения биэкспоненциальной формы [10] вида

$$u(t) = A(e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t}), \quad (2)$$

где A – амплитуда импульса, В; β_1 , β_2 – коэффициенты наклона экспонент, c^{-1} ; t – время, с.

Согласно принятому методу расчета, составляется уравнение, описывающее переходные процессы в схеме замещения на рисунке 1.

$$L \frac{di}{dt} + R_3 i = A(e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t}), \quad (3)$$

где R_3 – эквивалентное омическое сопротивление цепи, Ом.

$R_3 = R_{п1} + z + R_n$ на участке 1 ампер-вольтной характеристики, $R_3 = R_{п2} + z + R_n$ на участке 2 характеристики. Такое определение эквивалентного сопротивления допустимо, так как при составлении схем замещения по правилу Петерсона – Пффистера волновое сопротивление линии принимается омическим [6].

Решения уравнения (3) имеют одинаковую математическую форму при нахождении рабочей точки схемы на обоих участках ампер-вольтной характеристики и отличаются только константой интегрирования. На

участке 1 эта константа определяется из условия равенства нулю тока цепи в нулевой момент времени по закону коммутации. На участке 2 константа определяется из условия непрерывности тока в цепи, которое основано как на законе коммутации, так и на ампер-вольтной характеристике позистора.

Уравнение (3) – неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка. Его решение может быть получено методом Лагранжа [11] в виде суммы общего решения соответствующего однородного дифференциального уравнения и частного решения неоднородного дифференциального уравнения.

Общее решение [12] хорошо известно и имеет вид

$$i = K e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (4)$$

где K – константа интегрирования.

Частное решение уравнения (3) ищется по методу Лагранжа в виде

$$i = K(t) e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (5)$$

Подстановка (5) в (3) и преобразования позволяют получить общее решение неоднородного уравнения в виде

$$i = \frac{A}{L(-\beta_1 + \frac{R}{L})} e^{-\beta_1 t} - \frac{A}{L(-\beta_2 + \frac{R}{L})} e^{-\beta_2 t} + K e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (6)$$

На участке 1 по закону коммутации $i(0) = 0$. Тогда из (6) с учетом (1) получается формула для константы интегрирования

$$K_1 = \frac{A(\beta_2 - \beta_1)}{L(-\beta_2 + \frac{R_{31}}{L})(-\beta_1 + \frac{R_{31}}{L})}. \quad (7)$$

На участке (2) по условию непрерывности в момент времени t_n смены состояния позистора ток в цепи $i(t_n) = I_{\max}$. Тогда из (6) формула для константы интегрирования

$$K_2 = \frac{\left(\frac{A}{L(-\beta_1 + \frac{R_{32}}{L})} e^{-\beta_1 t_n} - \frac{A}{L(-\beta_2 + \frac{R_{32}}{L})} e^{-\beta_2 t_n} \right)}{e^{-\frac{R}{L}t_n}}. \quad (8)$$

По полученным расчетным соотношениям выполнен анализ переходных процессов в цепи с $z = 100$ Ом, $R_n = 10^4$ Ом и варьируемым значением L . Предполагалось, что $R_{п1} = 10$ Ом, $R_{п2} = 18000$ Ом, $I_{\max} = 0,03$ А. Помеховый импульс ЭСР имеет параметры $A = 1,235 \cdot 10^4$ В., $\alpha_1 = 9,324 \cdot 10^7$ c^{-1} , $\alpha_2 = 3,871 \cdot 10^8$ c^{-1} . Эти параметры соответствуют испытанию на устойчивость к ЭСР по третьей степени жесткости с амплитудой импульса 6000 В.

По соотношению (6) и (7) построен график переходного процесса на участке 1 ампер-вольтной характеристики позистора (рисунок 4), по (6) и (8) – график переходного процесса на участке 2 характеристики (рисунок 5).

Анализ численных экспериментов и рисунков 4 и 5 позволяет сделать выводы:

– амплитуда импульса тока в нагрузке может быть снижена в три раза, но этот защитный эффект может оказаться недостаточным для электронных устройств;

– определяющее влияние на протекание переходных процессов оказывает индуктивность цепи, но изменять ее в широких пределах не представляется возможным, из-за необходимости обеспечивать целостность полезного сигнала [1, 7];

– вторыми по значимости факторами, определяющими переходный процесс в схеме, являются сопротивление позистора в высокоомном состоянии и ток переключения в это состояние.

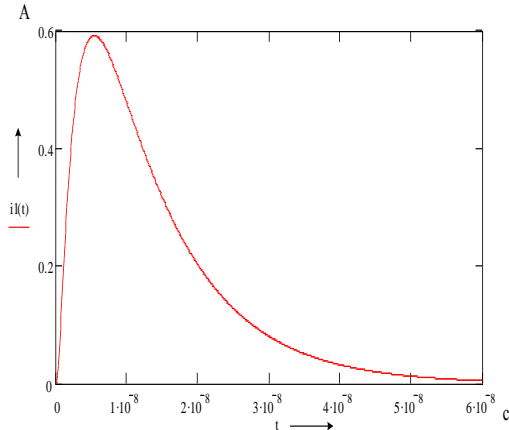


Рисунок 4 – График переходного процесса во входной цепи приемника данных при нахождении рабочей точки на участке 1 ампер-вольтной характеристики позистора

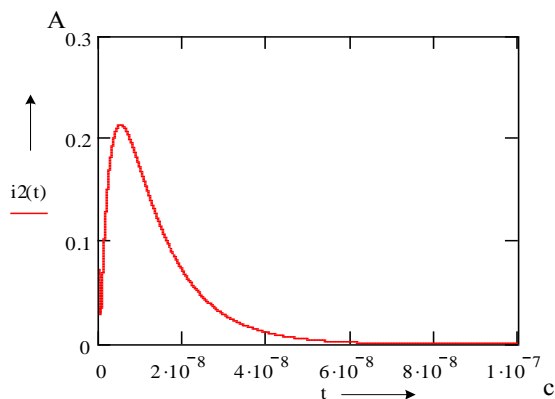


Рисунок 5 – График переходного процесса во входной цепи приемника данных при нахождении рабочей точки на участке 2 ампер-вольтной характеристики позистора

Таким образом, в силу сложности соотношений (6–8) для расчета переходных процессов и множества факторов, влияние которых на помехоподавляющие свойства схемы с защитным элементом нельзя выявить

Получено 10.10.2016

D. V. Komnaty. Pulse processes in input circuit with ohmic-resistor, inductor and protective posistor of data reception module. Electromagnetic processes arising in data reception input circuit with ohmic resistance, inductor, fitting by surge suppressor-posistor during the biexponential noise impulse influence are considered. Analysis is realized on grounds of Peterson – Pffister rule and piecewise-linear approximation. The impulse processes behavior and noise suppression dependence on circuit element parameters is established during the calculation results analysis. The necessity of circuits with protective elements-posistors operation modeling during the critical important information systems equipment design is grounded.

однозначно, для проектирования и обоснования выбора решений по подавлению СШИП в узлах электронной аппаратуры СЖАТ необходимо выполнение математического моделирования импульсных процессов в таких узлах. Для чего может применяться изложенная в статье методика? Следует отметить, что по сравнению с программами электротехнического моделирования предлагаемая методика построена на замкнутых выражениях ясного физического смысла, которые являются точными решениями дифференциальных уравнений переходных процессов в цепи. В этом состоит существенное преимущество предлагаемой методики. Реализация ее не вызывает затруднений. Поэтому результаты исследований, изложенные в данной работе, могут получить широкое практическое применение при разработке аппаратуры критически важных информационных систем, в том числе и железнодорожных.

Список литературы

- 1 **Кечиев, Л. Н.** Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л. Н. Кечиев, Е. А. Пожидаев. – М. : Технологии, 2005. – 352 с.
- 2 **Черепанов, В. П.** Защита радиоэлектронной аппаратуры от электрических перегрузок / В. П. Черепанов, Е. И. Посысаев. – М. : РадиоСофт, 2013. – 216 с.
- 3 **Vollman, S. H.** Electrical overstress (ESD). Devices, circuits and systems / S. H. Vollman. – Chichester : John Wiley and Sons Ltd, 2014. – 450 p.
- 4 **Weston, A.** Electromagnetic Compatibility : Principles and Applications / A. Weston. – N. Y. : Marcel Dekker, Inc., 2000. – 832 p.
- 5 **Волошин, И. Ф.** Переходные процессы в цепях с термисторами / И. Ф. Волошин, В. А. Палагин. – Минск : Наука и техника, 1967. – 244 с.
- 6 **Преснухин, Л. И.** Конструирование электронных вычислительных машин и систем / Л. И. Преснухин, В. А. Шахнов. – М. : Высш. шк., 1986. – 512 с.
- 7 **Князев, А. Д.** Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной техники с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечиев, Б. В. Петров. – М. : Радио и связь, 1989. – 224 с.
- 8 **Williams, B. W.** Power electronics / B. W. Williams. – Glasgow : University of Strathclyde, 2006. – 1499 p.
- 9 **Чурин, Ю. А.** Переходные процессы в линиях связи быстродействующих ЭВМ / Ю. А. Чурин. – М. : Сов. радио, 1975. – 207 с.
- 10 **Chen, H-Y.** Performance improvement of an ESD suppressor by studying its characteristics / H-Y. Chen, P-K. Le // 7th International Conference on Applied Electrostatics. – Bristol, UK. : IOP Publishing, 2012. – P. 1–5.
- 11 **Пономарев, К. К.** Специальный курс высшей математики / К. К. Пономарев. – М. : Высш. шк., 1974. – 367 с.
- 12 **Основы теории цепей** / В. Т. Зевеке [и др.]. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 572 с.