

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ УЗЛЫ ПРИ РЕМОНТЕ АППАРАТУРЫ ЖАТ МЕТОДОМ БЕРЖЕРОНА

Д. В. КОМНАТНЫЙ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Импульсные разряды статического электричества могут повреждать микроэлектронные элементы в узлах современных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) во время ремонта и профилактического обслуживания в сервисных центрах. Для обеспечения требуемого уровня безопасности при эксплуатации этих систем требуется разработать методы и математические модели, которые дают возможность прогнозировать последствия воздействия электростатического разряда (ЭСР) на аппаратуру СЖАТ в рассматриваемом случае.

Поскольку СЖАТ являются системами обеспечения безопасности движения поездов, то к результатам математического моделирования их помехоустойчивости предъявляются особо высокие требования в части достоверности и обоснованности результата. Ошибка в прогнозе электромагнитной совместимости такой системы грозит крайне серьезными последствиями для безопасности движения поездов. Одним из общепринятых методов обеспечения достоверности результата является решение задачи двумя независимыми способами.

При ЭСР на микроэлектронные узлы аппаратуры СЖАТ во время ремонта импульс разряда попадает непосредственно на линии связи узла, выполненного в виде печатной платы. Линии связи печатных плат моделируются цепью с распределенными параметрами без потерь. Распространение импульсных напряжений в такой цепи является переходным процессом и описывается волновым уравнением Даламбера гиперболического типа. Решение уравнения Даламбера может быть получено в аналитической форме методом характеристик, который восходит к трудам Л. Эйлера, Г. Монжа и О. Коши. Этот метод адаптирован к решению задач о переходных процессах в электрически длинных линиях без потерь. Адаптация имеет специальное название – метод Бержерона. Этот метод может быть сформулирован в аналитической и графической формах.

В аналитической форме расчетные соотношения метода Бержерона записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} u(0, t) &= Z_0 i(0, t) + u(l, t - T_p) - Z_0 i(l, t - T_p), \\ u(l, t) &= -Z_0 i(l, t) + u(0, t - T_p) + Z_0 i(0, t - T_p), \end{aligned}$$

где u – напряжение в линии, В; t – время, с; l – длина линии, м; Z_0 – волновое сопротивление линии, Ом; i – ток в линии, А; T_p – время распространения импульса вдоль линии, с.

Для проведения расчетов в форме, принятой в теории цепей, на основании этих выражений формируются схемы замещения для расчета тока и напряжения в начале и в конце линии. Каждая такая схема замещения представляет собой простейшую цепь последовательного соединения, в которую входят нагрузка конца или начала линии, резистор, сопротивление которого численно равно волновому сопротивлению линии, и источник ЭДС. ЭДС этого источника определяется значениями тока и напряжения на противоположном конце линии в момент времени $t - T_p$. Таким образом, формулы для расчета указанных ЭДС имеют вид

$$\begin{aligned} E(0, t) &= u(l, t - T_p) - Z_0 i(l, t - T_p), \\ E(l, t) &= u(0, t - T_p) + Z_0 i(0, t - T_p). \end{aligned}$$

Анализ переходных процессов по этим схемам замещения значительно упрощается. Кроме того, в задачах электромагнитной совместимости основной интерес представляют значения тока и напряжения в нагрузке линий. Следовательно, метод Бержерона позволяет провести вычисление параметров электромагнитной совместимости микроэлектронной техники.

При расчете переходных процессов воздействия ЭСР на линию связи печатной платы импульс напряжения ЭСР в начале линии имеет экспоненциальную форму

$$u(t) = U_0 e^{-\alpha t},$$

где U_0 – амплитуда импульса, В; α – постоянная времени импульса, 1/с.

Внутреннее сопротивление источника ЭСР при воздушном разряде можно принять равным 0 Ом, так как сопротивление искры разряда очень мало. Нагрузка на конце линии предполагается чисто омической R_n . Тогда расчетные соотношения для этого случая имеют вид

$$u(l, t) = \left(u(0, t - T_p) + Z_n i(0, t - T_p) \right) \frac{R_n}{R_n + Z_n},$$

$$i(l, t) = \frac{u(0, t - T_p) + Z_n i(0, t - T_p)}{R_n + Z_n},$$

$$u(0, t) = 0, \quad i(0, t) = -1 \left(\frac{u(l, t - T_p)}{Z_n} - i(l, t - T_p) \right).$$

Результаты расчетов по приведенным соотношениям можно представить в виде таблицы 1. В этой таблице n – номер импульса, поступившего в нагрузку на конце линии.

Таблица 1 – Напряжение и ток на концах линии при воздействии ЭСР

n	t	$u(0, t)$	$i(0, t)$	$u(l, t)$	$i(l, t)$
	$t = 0$	$u(t) = U_0 e^{-\alpha t}$	$\frac{U_0 e^{-\alpha t}}{Z_n}$	0	0
0	$t = T_p$	–	–	$\frac{2U_0 e^{-\alpha T_p} R_n}{Z_n + R_n}$	$\frac{2U_0 e^{-\alpha T_p}}{Z_n + R_n}$
	$t = 2T_p$	0	$\frac{-2U_0 e^{-\alpha T_p} R_n - Z_n}{Z_n R_n + Z_n^2}$	–	–
1	$t = 3T_p$	–	–	$-2U_0 e^{-\alpha T_p} \frac{R_n - Z_n}{R_n + Z_n} \frac{R_n}{Z_n + R_n}$	$-2U_0 e^{-\alpha T_p} \frac{R_n - Z_n}{(R_n + Z_n)^2}$
	$t = 4T_p$	0	$2 \frac{U_0 e^{-\alpha T_p}}{Z_n} \left(\frac{R_n - Z_n}{R_n + Z_n} \right)^2$	–	–
2	$t = 5T_p$	–	–	$2U_0 e^{-\alpha T_p} \left(\frac{R_n - Z_n}{R_n + Z_n} \right)^2 \frac{R_n}{Z_n + R_n}$	$2U_0 e^{-\alpha T_p} \frac{(R_n - Z_n)^2}{(R_n + Z_n)^3}$

В момент времени $t = nT_p$ напряжение в нагрузке конца линии вычисляется по формуле

$$u(l, t) = 2U_0 e^{-\alpha t} (-1)^n \left(\frac{R_n - Z_n}{R_n + Z_n} \right)^n \frac{R_n}{Z_n + R_n}.$$

Полученное выражение совпадает с решением, полученным по правилу Петерсона – Пффистера в ранее опубликованных работах автора. Правило Петерсона – Пффистера является по физическому смыслу адаптацией для нужд теории цепей известного метода Даламбера падающих и отраженных волн решения волнового уравнения. Поэтому указанное правило и рассмотренный в докладе метод Бержерона являются независимыми и могут использоваться для взаимной проверки. Совпадение результатов расчета обоими методами позволяет считать, что процесс распространения импульса ЭСР по линиям связи микроселекционных узлов аппаратуры СЖАТ при общепринятом в литературе моделировании линии связи электрически длинной линией без потерь рассчитан верно. Следовательно, результаты расчета воздействия импульса ЭСР на узлы этой аппаратуры могут обоснованно использоваться при анализе электромагнитной совместимости систем обеспечения безопасности движения поездов.

Необходимо отметить, что оба метода расчета импульсных и переходных процессов в длинных линиях без потерь имеют сравнимую трудоемкость. В методе Бержерона требуется запись протяженной таблицы. По правилу Петерсона – Пффистера требуется графическое построение временной диаграммы распространения импульса. Поэтому взаимная проверка двух методов не приводит к чрезмерному увеличению затрат времени на расчеты, повышая их достоверность.