

При разработке новых СЖАТ описанная модель дает возможность прогноза устойчивости аппаратуры СЖАТ к ЭИПВ, оценки достигнутого уровня защиты. Также возможно выработать требования к размещению оборудования, к конструкции технологических зданий и к организации радиуса защиты.

По результатам доклада можно сделать вывод, что представленная математическая модель анализа и прогнозирования устойчивости СЖАТ к ЭИПВ позволяет решить актуальную проблему защиты микропроцессорных и компьютерных СЖАТ от ЭИПВ. Эта проблема обостряется с введением многоуровневых компьютерных СЖАТ управления движением поездов на высокоскоростных магистралях, которые проектируются в Союзном государстве Беларуси и России. Причем сложность проблемы увеличивается в связи с необходимостью обеспечения требований импортозамещения и независимости железных дорог Союзного государства от внешних производителей из стран, проводящих недружественную политику.

К достоинствам модели можно отнести использование хорошо отработанных процедур испытаний СЖАТ на устойчивость к ЭСР, при которых применяется доступное оборудование. При этом не требуются экранированные камеры или открытые тест-площадки. Организация последних затруднена в городской и пригородной застройке. Так как модель реализует сопоставление ЭСР и ЭИПВ аналитическими методами, то она обладает новизной и может найти применение в практике работы организаций, разрабатывающих и эксплуатирующих СЖАТ.

УДК 656.25

## **РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ ОПЕРАТОРНЫМ МЕТОДОМ**

*Д. В. КОМНАТНЫЙ*

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

Одной из задач, возникающих при анализе электромагнитной совместимости (ЭМС) микроэлектронной аппаратуры систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), является расчет распространения коротких помеховых импульсов в линиях передачи сигналов узлов этой аппаратуры.

В настоящее время электронные узлы изготавливаются в виде печатных плат. Линии передачи сигналов таких узлов моделируются цепями с распределенными параметрами, омические потери в которых отсутствуют. Нагрузка на приемном конце линии может быть представлена в виде последовательной, параллельной или смешанной цепи из омических сопротивлений и емкостей ( $RC$ -цепь).

Для анализа распространения импульсных помех в линии передачи сигнала требуется решить уравнение Даламбера относительно напряжения. Начальные условия принимаются нулевыми. В начало линии подается импульс напряжения. Конец линии нагружен на  $RC$ -цепь. Для решения задачи математической физики в замкнутом виде целесообразно применить операторный метод. Однако такая постановка задачи о расчете переходных процессов в идеальной длинной линии не представлена в монографиях по расчету переходных процессов.

Поэтому необходимо рассмотреть решение задачи о расчете переходных процессов в идеальной длинной линии операторным методом, если постановка задачи приближена к практике анализа ЭМС узлов электронной аппаратуры.

Для определенности принимается, что в линию поступает экспоненциальный импульс, который имеет изображение по Лапласу

$$U_{\text{вх}}(p) = \frac{U}{p + \alpha}, \quad (1)$$

где  $U$  – амплитуда импульса, В;  $\alpha$  – параметр затухания импульса, 1/с.

Линия нагружена на цепь в виде параллельного соединения резистора с сопротивлением  $R$  и конденсатора с емкостью  $C$ . Операторное сопротивление нагрузки

$$Z(p) = \frac{R \frac{1}{Cp}}{R + \frac{1}{Cp}} = \frac{R}{RCp + 1}. \quad (2)$$

На основании известного решения для изображения по Лапласу напряжения в идеальной длинной линии имеем

$$U(p) = \frac{U \left[ (RCp + 1) \operatorname{sh}(p \sqrt{L_0 C_0} (l - x)) + \frac{R}{\rho} \operatorname{ch}(p \sqrt{L_0 C_0} (l - x)) \right]}{(p + \alpha) \left[ (RCp + 1) \operatorname{sh}(pl \sqrt{L_0 C_0}) + \frac{R}{\rho} \operatorname{ch}(pl \sqrt{L_0 C_0}) \right]}, \quad (3)$$

где  $L_0$  – погонная индуктивность линии, Гн/м;  $C_0$  – погонная емкость линии, Ф/м;  $l$  – длина линии, м;  $x$  – координата точки на линии, м;  $\rho = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$  – волновое сопротивление линии, Ом.

В задачах ЭМС, как правило, представляет интерес электрические процессы в нагрузке при  $x = l$ . Тогда из (3) следует

$$U(p) = \frac{U \frac{R}{\rho}}{(p + \alpha) \left[ (RCp + 1) \operatorname{sh}(pl \sqrt{L_0 C_0}) + \frac{R}{\rho} \operatorname{ch}(pl \sqrt{L_0 C_0}) \right]} = U \frac{G(p)}{H(p)}. \quad (4)$$

Для получения оригинала операторного выражения (4) используется теорема Хэвисайда.

Характеристическое уравнение  $H(p) = 0$  имеет один корень  $p = -\alpha$  и множество корней вида  $p_k = -\sigma_k \pm j\omega_k$ , где  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , которые обращают в нуль выражение в квадратных скобках из (4)

$$(RCp_k + 1) \operatorname{sh}(p_k l \sqrt{L_0 C_0}) + \frac{R}{\rho} \operatorname{ch}(p_k l \sqrt{L_0 C_0}) = 0. \quad (5)$$

Корни  $p_k$  должны быть комплексными, так как переходные процессы должны затухать, а затухание определяется действительной частью комплексного корня. Уравнение (5) является трансцендентным. В настоящее время его корни могут быть найдены методами компьютерной математики. В частности, предложен итерационный метод отыскания корней. Полученные таким образом решения (5) справедливы как для слабого, так и для значительного затухания переходных процессов. Однако практически возможно получить ограниченное число корней с погрешностью, вносимой используемым численным методом.

Для корня  $p = -\alpha$  оригинал (4) имеет вид

$$u_{\text{л}}(t) = \frac{U \frac{R}{\rho} e^{-\alpha t}}{(1 - RC\alpha) \operatorname{sh}(-\alpha l \sqrt{L_0 C_0}) + \frac{R}{\rho} \operatorname{ch}(-\alpha l \sqrt{L_0 C_0})}. \quad (6)$$

Для корня вида  $p_k = -\sigma_k \pm j\omega_k$  оригинал (4) имеет вид

$$u_k(t) = 2 \operatorname{Re} \frac{G(p_k)}{H'(p_k)} e^{p_k t} = 2 A_k e^{-\sigma_k t} \cos(\omega_k t + \psi_k) \quad (7)$$

с учетом представления  $\frac{G(p_k)}{H'(p_k)} = A_k e^{j\psi_k}$ .

Указанное представление в виде замкнутой общей формулы имеет крайне громоздкую и неудобную на практике форму. Поэтому следует вести расчет путем подстановки численного значения соответствующего корня  $p_k$  в (7).

Результирующее напряжение в конце линии представляется в виде ряда Фурье с затухающими членами

$$u(t) = u_{\text{л}}(t) + \sum_{k=1}^N u_k(t), \quad (8)$$

где  $N$  – число корней.

Это соответствует физическому смыслу задачи: переходные процессы в линии должны затухать как по причине потерь в нагрузке, так и по причине затухания импульса входного напряжения.

Тогда допустимо сделать вывод по докладу, что операторный метод позволяет осуществить расчет помеховых импульсных напряжений в нагрузках линий передачи сигналов электронных узлов. Основную погрешность в расчет вносит численный метод определения корней характеристического уравнения. Как показывает практика, это ограничение не является определяющим. Поэтому рассмотренный метод может использоваться при предиктивном проектировании аппаратуры современных СЖАТ.

УДК 656.25

## РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В АКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ЦЕПЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Д. В. КОМНАТНЫЙ*

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

В различных областях цифровой электронной техники наличествуют объекты, расчетные модели которых представляют собой линейные цепи с распределенными  $RC$ -параметрами. Первой группой таких объектов являются микросхемы, структуры которых образованы чередующимися слоями проводящих и диэлектрических материалов. Второй – кабели цифровых систем передачи информации. Для анализа передачи цифровых сигналов, особенно для оценки искажения передачи импульсов по кабелю, находят широкое применение импульсные характеристики и глаз-диаграммы. Расчет этих характеристик осуществляется по математической модели кабеля как цепи с распределенными  $RC$ -параметрами.

Широкое распространение микропроцессорных систем автоматики и цифровых систем оперативно-технологической связи на железнодорожном транспорте делает востребованным анализ функционирования указанных выше объектов техники для разработчиков систем автоматики, телемеханики и связи железных дорог. Это объясняется тем, что в микроэлектронных и микропроцессорных системах автоматики и телемеханики должна применяться высококачественная элементная база, разработанная на высоком техническом уровне. От работы оперативно-технологической связи во многом зависит бесперебойное осуществление перевозочного процесса. Следовательно, представляют практический и теоретический интерес методы анализа передачи импульсных сигналов в  $RC$ -цепях с распределенными параметрами.

В связи с этим, в докладе рассматривается метод анализа распространения импульсных сигналов в линейной цепи с распределенными  $RC$ -параметрами, отличающийся выбором тестового сигнала. Удачный выбор этого сигнала позволяет рассчитать электромагнитные процессы при распространении реального сигнала с высокой точностью и, вместе с тем, получить расчетные соотношения в замкнутой форме. По таким соотношениям расчеты реальных устройств осуществляются со сравнительно меньшими затратами времени.

В докладе рассматривается цепь с распределенными параметрами: погонным омическим сопротивлением  $R$  и погонной емкостью  $C$ . На ее входе подключен источник ЭДС с внутренним омическим сопротивлением  $R_0$ , на выходе подключена нагрузка с омическим сопротивлением  $R_l$ . Операторное волновое сопротивление такой цепи  $Z(p) = \sqrt{\frac{R}{pC}} = \frac{1}{\sqrt{p}} \sqrt{\frac{R}{C}} = \frac{K}{\sqrt{p}}$ , операторный

коэффициент распространения –  $\gamma = RC \sqrt{p}$ .

Для анализа работы указанных выше объектов техники достаточен расчет напряжения на нагрузке цепи, для чего применяется коэффициент передачи. На основании известного выражения