

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 Беларусь 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 установленными 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 начале 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,  $\Phi/\text{м}$ ;  $l$  – 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

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

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

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

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 существуют 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