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

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

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

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

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

$$U(p)=\frac{U\left[(RCp+1)\mathrm{sh}\left(p\sqrt{L_0C_0}(l-x)\right)+\frac{R}{\rho}\mathrm{ch}\left(p\sqrt{L_0C_0}(l-x)\right)\right]}{(p+\alpha)\left[(RCp+1)\mathrm{sh}\left(pl\sqrt{L_0C_0}\right)+\frac{R}{\rho}\mathrm{ch}\left(pl\sqrt{L_0C_0}\right)\right]}, \tag{3}$$

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

$$U(p)=\frac{U\frac{R}{\rho}}{(p+\alpha)\left[(RCp+1)\mathrm{sh}\left(pl\sqrt{L_0C_0}\right)+\frac{R}{\rho}\mathrm{ch}\left(pl\sqrt{L_0C_0}\right)\right]}=U\frac{G(p)}{H(p)}. \tag{4}$$

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 $k=0,\pm1,\pm2\ldots$, которые обращают в нуль выражение в квадратных скобках из (4)

$$(RCp_k+1)\mathrm{sh}\left(p_k l\sqrt{L_0C_0}\right)+\frac{R}{\rho}\mathrm{ch}\left(p_k l\sqrt{L_0C_0}\right)=0. \tag{5}$$

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

$$u_{\text{Л}}(t)=\frac{U\frac{R}{\rho}e^{-\alpha t}}{(1-RC\alpha)\mathrm{sh}\left(-\alpha l\sqrt{L_0C_0}\right)+\frac{R}{\rho}\mathrm{ch}\left(-\alpha l\sqrt{L_0C_0}\right)}. \tag{6}$$

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

$$u_k(t)=2\,\mathrm{Re}\frac{G(p_k)}{H'(p_k)}e^{pk^t}=2A_k e^{-\sigma_{k^t})}\cos(\omega_k t+\upsilon_k) \tag{7}$$

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

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

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

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 $Z(p) = \sqrt{\dfrac{R}{pC}} = \dfrac{1}{\sqrt{p}}\sqrt{\dfrac{R}{C}} = \dfrac{K}{\sqrt{p}}$, 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