

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

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

коэффициента передачи цепи с распределенными параметрами и активными нагрузками коэффициент передачи для  $RC$ -цепи имеет вид

$$K(p) = \frac{R_0^2 K \sqrt{p}}{(\sqrt{p} R_0 + K)(\sqrt{p} R_l + K)} e^{-lRC\sqrt{p}}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина линии, м.

В качестве тестового импульса в литературных источниках предлагается использовать аппроксимацию прямоугольного импульса и импульса с искаженным фронтом в виде разности дополнительных интегралов вероятности

$$u(t) = U_{\text{вх}} \left[ \operatorname{erfc} \frac{\delta}{2\sqrt{t}} - \operatorname{erfc} \frac{\delta}{2\sqrt{t-t_i}} \right], \quad (2)$$

где  $U_{\text{вх}}$  – амплитуда импульса, В;  $t$  – время, с;  $\delta$  – параметр искажения фронта импульса, с;  $t_i$  – длительность импульса, с. Также  $\operatorname{erfc}(t) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-y^2} dy$ .

Тогда изображение по Лапласу выражения (2) по теореме запаздывания операционного исчисления имеет вид

$$U(p) = U_{\text{вх}} \left[ \frac{1}{p} e^{-\delta\sqrt{p}} - \frac{1}{p} e^{-\delta\sqrt{p}} e^{-pt_i} \right]. \quad (3)$$

Изображение напряжения на нагрузке получается, как произведение выражений (1) и (3). Тогда для получения оригинала напряжения на нагрузке требуется найти оригиналы следующих операторных выражений

$$\frac{R_0^2 K \sqrt{p}}{(\sqrt{p} R_0 + K)(\sqrt{p} R_l + K)} e^{-lRC\sqrt{p}} \frac{1}{p} e^{-\delta\sqrt{p}}; \quad (4)$$

$$\frac{R_0^2 K \sqrt{p}}{(\sqrt{p} R_0 + K)(\sqrt{p} R_l + K)} e^{-lRC\sqrt{p}} \frac{1}{p} e^{-\delta\sqrt{p}} e^{-pt_i}. \quad (5)$$

По теореме свертывания операционного исчисления оригинал выражения (4) имеет вид

$$\frac{R_0^2}{R_0 + R_l} \int_0^t \frac{\exp -\frac{(RCl + \delta)^2}{4\tau}}{\sqrt{\pi\tau}} \left( e^{-\frac{K(t-\tau)}{R_0}} - e^{-\frac{K(t-\tau)}{R_l}} \right) dt. \quad (6)$$

Так как выражение (5) отличается от (4) только множителем  $e^{-pt_i}$ , то по теореме запаздывания операционного исчисления оригинал (5) получается по выражению (6), в котором вместо  $t$  записано  $\tau - t_i$  и  $d\tau = d(t - t_i)$ .

Таким образом, использование тестового импульса в виде (2) позволяет легко получить выражения для мгновенного напряжения на нагрузке цепи с распределенными  $RC$ -параметрами. При этом применяются только известные теоремы операционного исчисления и таблицы оригиналов и изображений. Однако интеграл в (6) не может быть взят в аналитической форме. Поэтому расчеты требуют значительной работы по численному интегрированию.

Несмотря на это обстоятельство, полученные выражения полностью решают задачу определения электрического режима в омической нагрузке цепи с распределенными  $RC$ -параметрами и могут найти применение при проектировании узлов железнодорожной автоматики и линий связи.

Следует отметить, что в литературных источниках описано применение тестового импульса (2) для анализа перекрестных помех в проводных линиях связи. Параметры этих линий существенно отличаются от параметров линий, рассматриваемых в докладе. Использование тестового импульса (2) для анализа функционирования элементной базы современных систем железнодорожной автоматики и телемеханики и для анализа линий современной связи не рассматривалось. Поэтому результаты доклада имеют существенную новизну и актуальность для обеспечения безопасности движения поездов на железных дорогах.