структур микропроцессорных централизаций дублированную систему 2х2 с горячим резервированием. Такой принцип используется, например, в одной из самых современных западных систем ALISTER.

Обеспечение заданного уровня безопасности основывается на следующих принципах: дублированные части являются независимыми; все релевантные данные по безопасности регулярно сравниваются; предполагаемые неисправности определяются в течение короткого промежутка времени, позволяющего переключиться на резерв, не нарушая безопасности; определен регламент восстановления системы после перехода на резерв или при запуске остановленной части оборудования системы; определены меры для обнаружения недетектированных (не проявляющихся) неисправностей; в каждом цикле программное обеспечение проводит тестирование аппаратных средств (таких, как регистры общего назначения и память); хранение программных данных реализовано таким образом, что искажение любого бита или байта при адресации не приводит к наложению одних данных на другие.

Неодновременное проявление отказа позволяет обнаружить одиночный отказ до появления второго. Это достигается за счёт диверсификации ПО ядер двух параллельных каналов. Программы ядра первого и второго каналов скомпилированы разными компиляторами. Внутренние циклы выполнения всех алгоритмов различны, что создаёт диверситет при выполнении одинаковых по внешним проявлениям алгоритмов СЦБ.

Для ускорения цикла испытаний и ввода в опытную эксплуатацию разработанной системы микропроцессорной централизации стрелок и сигналов были заказаны два ее комплекта, один из которых монтировался на станции Ипуть, тогда как на втором комплекте проводился полный цикл приемочных испытаний. На этом этапе также использовались методы CALS-технологий. Стоимость аппаратных средств современных микропроцессорных систем составляет примерно 10–15 % от стоимости разработки, поэтому выигрыш от ускорения их разработки и ввода в эксплуатацию существенно превысит эти затраты.

Проведение полного цикла приемочных испытаний в НИЛ «Безопасность и ЭМС технических средств» БелГУТа осуществлялось на макетном образце, полностью идентичном натурному, за исключением напольного оборудования, которое заменялось разработанным в БелГУТе имитатором технологических ситуаций.

Использование CALS-технологий позволило существенно сократить сроки при разработке, испытаниях и подготовке к вводу в опытную эксплуатацию отечественной микропроцессорной централизации стрелок и сигналов на станции Ипуть.

Предварительные расчеты показывают, что стоимость оборудования станции Ипуть отечественной микропроцессорной централизацией по приведенному показателю на одну стрелку в два раза ниже зарубежных аналогов.

В настоящее время с использованием CALS-технологий в БелГУТе ведутся работы по наращиванию мощности ядра системы и интеграции алгоритмов автоблокировки АБТЦ-2000 в ядро системы, что позволит создать перспективный комплекс систем автоматики и телемеханики для автоматизации работы участков железных дорог.

Таким образом, создание отечественной микропроцессорной системы централизации стрелок и сигналов позволит сэкономить значительные валютные средства за счет импортозамещения, что прямо отвечает требованиям п. 1.4 Директивы № 3 Президента Республики Беларусь.

УДК 621.396:621.82

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОНТРОЛЯ И НОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭМС

К. А. БОЧКОВ, Н. В. РЯЗАНЦЕВА

Белорусский государственный университет транспорта

Широкое внедрение микроэлектронной техники повысило значение обеспечения условий безопасности функционирования устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), которые могут нарушаться в результате воздействия помех. В связи с этим возросла актуальность решения задачи электромагнитной совместимости (ЭМС) электронных и электротехнических систем. Наибольшие успехи в решении проблемы ЭМС достигнуты в отношении радиоэлектронных средств (РЭС). Этот опыт требует критического анализа для оценки применимости его к решению проблемы ЭМС ОТП и, в частности, микроэлектронных СОБД. Авторами разработаны методы нормирования на основе подходов, использующих идеологию построения динамических моделей ЭМС РЭС.

Для случая динамических моделей контроля ЭМС ОТП получение нормированных значений степени помехозащищенности должно учитывать деградацию во времени числовых характеристик нестационарного случайного процесса степени помехозащищенности микроэлектронных устройств. Рассмотрены основные методы, позволяющие решить задачу построения динамической модели ЭМС ОТП. Один из основных – метод функций Грина. Для одно- и многомерных случайных процессов на основе этого метода разработаны модели, использующие зависимости между корреляционными функциями входного и выходного процессов:

$$K_u(t_1,t_2) = H_{t1}H_{t2}K_u(\tau_1,\tau_2). \tag{1}$$

Рассмотрен случай, когда внешнее воздействие характеризуется одной функцией времени $q(t)$, а поведение системы – одной функцией времени $u(t)$:

$$u(t) = \int_{-\infty}^{t} h(t,\tau)q(\tau)d\tau\,, \tag{2}$$

где $h(t, \tau)$ – решение соответствующего дифференциального уравнения при $q(t) = d(t-\tau)$. Это решение имеет смысл реакции системы на единичный импульс, прикладываемый в момент времени $t = \tau$. Формула (2) записана в предположении, что воздействие $q(t)$ задано при $-\infty < t < \infty$. Если система находилась в покое при $t < 0$ и если воздействие задано при $0 \le t < \infty$, то нижний предел интегрирования следует положить равным нулю. Тогда формула для математического ожидания выходного процесса принимает вид

$$< u(t) > = \int_{-\infty}^{t} h(t,\tau) < q(\tau) > d\tau\,. \tag{3}$$

Аналогично,

$$< u(t_1)u(t_2) > = \int_{-\infty}^{t1}\int_{-\infty}^{t2} h(t,\tau_1)h(t,\tau_2) < q(\tau_1)q(\tau_2) > d\tau_1 d\tau_2\,; \tag{4}$$

$$< u(t_1)u(t_2)\ \dots\ u(t_n) > = \int_{-\infty}^{t1}\int_{-\infty}^{t2}\int_{-\infty}^{tn} h(t,\tau_1)h(t,\tau_2)\ \dots\ h(t,\tau_n) < q(\tau_1)q(\tau_2)\ \dots > d\tau_1 d\tau_2 \dots \tag{5}$$

Особый интерес представляют стационарные системы. Для таких систем функция Грина $h(t, \tau)$ зависит явно только от разности $t - \tau$. Таким образом, $h(t, \tau) = h(t - \tau)$, и

$$< u(t) > = \int_{-\infty}^{t} h(t-\tau) < q(\tau) > d\tau\,. \tag{7}$$

Связь между корреляционными функциями входного и выходного процессов описывается выражением

$$< K_{ujuk}(t_1,t_2) > = \sum_{\alpha=1}^{n}\sum_{\beta=1}^{n}\int_{-\infty}^{t_1}\int_{-\infty}^{t_2} h_{j\alpha}(t_1,\tau_1)h_{k\beta}(t_2,\tau_2)K_{q\alpha q\beta}(\tau_1,\tau_2)d\tau_1 d\tau_2\,, \tag{8}$$

где $j, k = 1, 2, \dots, m$.

Второй метод, использованный авторами для построения динамических моделей, – метод спектральных представлений. Суть этого метода состоит в том, что случайная функция представляется в виде обобщенного ряда Фурье со случайными коэффициентами или в виде обобщенного интеграла Фурье, спектр которого есть случайная функция. Действия над заданной случайной функцией заменяются действиями над ее коэффициентами или трансформантой Фурье. При любом спектральном составе заданного процесса его трансформанта Фурье оказывается белым шумом.

Рассмотрено прохождение процесса через линейную детерминистическую систему. Для математического ожидания выходного процесса используется формула

$$< u(t) > = \sum_{k=1}^{n} < \theta_k > \varphi_k(t). \tag{9}$$

Моментная функция второго порядка выходного процесса вычисляется по формуле

$$< u(t_1)u(t_2) > = \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} < \theta_k \theta_j > \varphi_k(t_1)\varphi_k(t_2), \tag{10}$$

и т. д.

Таким образом, при заданных моментах коэффициентов ряда решение задачи о прохождении процесса через линейную систему сводится к решению вспомогательного детерминистического уравнения и применению формул типа (9) и (10).

Для процессов, заданных при $-\infty < t < \infty$, и, в частности, для стационарных случайных процессов было использовано спектральное представление в виде обобщенного интеграла Фурье:

$$q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Q(\omega)\varphi(t|\omega)d\omega. \tag{11}$$

Здесь $\varphi(t \mid \omega)$ – детерминистическая функция времени t и параметра преобразования ω, $Q(\omega)$ – случайная функция параметра ω. Без ограничения общности можно считать, что параметр ω принимает все возможные действительные значения $-\infty < \omega < \infty$. Функцию $Q(\omega)$ будем называть спектром процесса $q(t)$.

Примером стохастически ортогонального интегрального представления типа (10) является разложение центрированного стационарного случайного процесса в интеграл Фурье:

$$q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Q(\omega)\exp(j\omega t)d\omega. \tag{12}$$

При этом, очевидно, $\varphi(t \mid \omega) = e^{i\omega t}$. Нетрудно показать, что спектр $Q(\omega)$ является дельта-коррелированной функцией.

Если входной процесс $q(t)$ задан соответствующим выражением, то можно получить математическое ожидание выходного процесса, а также корреляционную функцию – по формуле типа

$$K_q(t,t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)\varphi_k^*(t_1|\omega)\varphi_k(t_2|\omega)d\omega. \tag{13}$$

Вероятностные характеристики выходного процесса определяются далее осреднением соответствующих выражений, получаемых на основе выражения (13). Метод спектральных представлений легко распространяется на многомерные случайные процессы. Здесь используется формула для взаимных корреляционных функций

$$K_{ujuk}(t_{1,}t_2) = \sum_{\alpha=1}^{m} \sum_{\beta=1}^{m} \int_{-\infty}^{\infty} S_{q_\alpha q_\beta}(\omega)\varphi^*_{j\alpha}(t_1|\omega)\varphi_{k\beta}(t_2|\omega)d\omega, \tag{14}$$

Таким образом, использование аппарата теории случайных процессов дает возможность разработки принципов нормирования с учетом изменений случайных величин уровней помех во времени.