

# АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ

---

УДК 004.786:519.711.3

**А. С. Кобайло**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИНТЕЗА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ РАДИОСИГНАЛОВ

Рассмотрены возможности использования элементов теории синтеза вычислительных систем реального времени (ТСВСПВ) для моделирования физических процессов. Применение положений теории показано на примере синтеза специализированного вычислительного устройства для формирования радиосигналов в составе автоматизированной системы полунатурных испытаний радиотехнических средств или тренажеров радиооператоров. При этом использована математическая модель радиосигналов, приведенная к виду, допускающему графовое представление.

The possibilities of using the elements of the theory of synthesis of computing systems real-time for modeling physical processes. Application of the theory illustrated by the synthesis of a specialized computing device for generating radio signals in the automated system of HIL testing radio equipment or simulators radio operators. The author used a mathematical model of the radio, reduced to mean admitting graph representation.

**Введение.** Проблемы обучения, научного эксперимента, обеспечения требуемых эксплуатационных показателей вновь создаваемого оборудования различного назначения неразрывно связаны с задачей моделирования физических процессов. При этом эффективность исследований или обучения, как правило, достигается моделированием физической среды эксплуатации оборудования или деятельности обучаемого специалиста в реальном масштабе времени. Решение проблемы формирования условий, адекватных реальным, становится возможным с использованием специализированных вычислительных средств – автоматизированных систем полунатурных испытаний, позволяющих в лабораторных условиях создавать (моделировать) воздействия на объект исследований, адекватные реальным условиям эксплуатации исследуемого оборудования. Неотъемлемыми компонентами таких систем являются специализированные аппаратные средства для формирования различных воздействий на объект исследований. Опыт разработки таких систем и участия в их создании позволил выработать некоторые единые подходы к решению проблемы, нашедшие отражение в основных положениях теории синтеза вычислительных систем реального времени (ТСВСПВ) [1]. Рассмотрим возможности использования элементов ТСВСПВ для моделирования физических процессов на примере разработки специализированных вычислительных устройств (СВУ) для формирования радиосигналов (в частности, отраженных сигналов).

**Основная часть.** Исходными данными для синтеза вычислительной системы реального времени являются: аналитическое выражение модели вычислительного процесса или алгоритм его реализации; требования реального времени; характеристики функциональных устройств (ФУ), способных в совокупности реализовать все операции алгоритма в соответствии с моделью, заданные в виде  $\{\tau_i^j\}, \{\xi_m\}$ , где  $\tau_i^j$  – время выполнения  $j$ -м ФУ операции, соответствующей  $i$ -й вершине графа реализации;  $\xi_{ib}$  –  $p$ -й технический параметр  $j$ -го ФУ (стоимость, мощность и т. д.); критерии оптимальности  $\xi_b \rightarrow \min, \xi_c \rightarrow \max, b, c \in \{p\}$ . Теория синтеза ВСПВ подразумевает выполнение последовательности процедур, основанных на выделении временной иерархии для вершин графа алгоритма и на условии реализуемости путей алгоритма в реальном времени (подробно см. в работе [1]). В качестве исходной математической модели будем использовать базовую модель вычислительного процесса формирования «полезной» составляющей радиотехнических сигналов по совокупности объектов и периодов обращения к ним с учетом динамики обстановки. Данная модель получена из известного аналитического выражения математической модели для пачки импульсов одиночного объекта путем суммирования по совокупности объектов и периодов обращения и введения единичных функций временных преобразований процессов на базе функций Хевисайда [2]:

$$\begin{aligned}
y_i(t - \tau_3, \alpha, \beta) = & \\
= E_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{K_p^{(m,n,k)}} \sum_{j=1}^{S_k^{(m,n,k)}} & F_{\text{дн}}(\Delta\alpha^{(m,n,k)}, \Delta\beta^{(m,n,k)}) F'_{\text{дн}}(\Delta\alpha'^{(m,n,k)}, \Delta\beta'^{(m,n,k)}) \times \\
\times Z_{\phi(j)}^{(m,n,k)}(t) K_{E(j)}^{(m,n,k)} F_{\text{зр}} & \left[ U^{(m,n,k)}(t), \chi_3(\tau_{3(i,j)}^{(m,n,k)}, \tau_{3(j)}'^{(m,n,k)}), K_{d(j)}^{(m,n,k)} \right] \times \\
\times F_{\text{зр}} \left\{ \left[ \chi_p(t_{\text{и}}^{(m,n)}, \Delta T^{(m,n)}) \chi_p & (t_{\text{и}}^{(m,n,k)}, \tau_{\text{и}}^{(m,n,k)}) \right] \chi_3(\tau_{3(i,j)}^{(m,n,k)}, \tau_{3(j)}'^{(m,n,k)}), K_{d(j)}^{(m,n,k)} \right\} \times \\
\times F_3 \left\{ F_{\cos} \left[ (\omega_0^{(m,n,k)} + \Delta\omega_{(j)}^{(m,n,k)}), \psi_{(j)}^{(m,n,k)} & + \Phi_{p(j)}^{(m,n,k)}(t) \right], \chi_3(\tau_{3(i,j)}^{(m,n,k)}, \tau_{3(j)}'^{(m,n,k)}) \right\},
\end{aligned}$$

где  $y_i(\cdot)$  – сигнал, принятый  $i$ -м каналом фазированной антенной решетки;  $t$  – текущее время;  $\tau_3$  – задержка принятого сигнала;  $\alpha, \beta$  – угловые координаты (азимут и угол места) объекта;  $E_0 = \sqrt{E_x}$ ,  $E_x$  – мощность зондирующего сигнала в направлении максимального излучения;  $M$  – количество циклов обращения к объектам;  $N_m$  – количество пачек  $m$ -го цикла;  $K_p^{(m,n,k)}$  – количество импульсов в  $n$ -й пачке  $m$ -го цикла;  $J^{(m,n,k)}$  – количество объектов на  $k$ -м направлении в  $n$ -й пачке  $m$ -го цикла;  $F_{\text{дн}}(\cdot)$  – нормированная функция диаграммы направленности передающей антенны;  $\Delta\alpha^{(m,n,k)}, \Delta\beta^{(m,n,k)}$  – функции изменения разности между угловыми координатами объектов и направлением максимального излучения диаграммы направленности (ДН) передающей антенны;  $F'_{\text{дн}(i)}(\cdot)$  – функция ДН антенны  $i$ -го приемного канала;  $\Delta\alpha'^{(m,n,k)}, \Delta\beta'^{(m,n,k)}$  – законы изменения разностей между угловыми координатами объектов и направлением максимума ДН  $i$ -го канала приемной антенны;  $Z_{\phi(j)}^{(m,n,k)}$  – закон флуктуации  $j$ -го объекта на  $k$ -м направлении в  $n$ -й пачке  $m$ -го цикла;  $K_{E(j)}^{(m,n,k)} = \sqrt{E_j^{(m,n,k)} / E_x}$  – коэффициент затухания  $k$ -го импульса  $n$ -й пачки  $m$ -го цикла  $j$ -го объекта;  $U^{(m,n,k)}(t)$  – функция свертки  $k$ -го импульса  $n$ -й пачки  $m$ -го цикла;  $\tau_{3(i,j)}^{(m,n,k)}$  – детерминированная составляющая длительности задержки импульса  $j$ -го объекта на входе  $i$ -го приемного канала относительно  $k$ -го выходного импульса системы  $n$ -й пачки  $m$ -го цикла;  $\tau_{3(i,j)}'^{(m,n,k)}$  – случайная составляющая задержки  $k$ -го импульса  $n$ -й пачки  $m$ -го цикла  $j$ -го объекта;  $K_{d(j)}^{(m,n,k)}$  – коэффициент радиальной протяженности  $j$ -го объекта на  $k$ -м направлении  $n$ -й пачки  $m$ -го цикла;  $t_{\text{и}}^{(m,n)}, \Delta T^{(m,n)}$  – момент начала формирования и длительности соответственно  $n$ -ой пачки  $m$ -го цикла;  $t_{\text{и}}^{(m,n,k)}, \tau_{\text{и}}^{(m,n,k)}$  –

момент начала формирования и длительность соответственно  $k$ -го импульса  $n$ -ой пачки  $m$ -го цикла;  $\omega_0^{(m,n,k)}$  – несущая частота  $k$ -го импульса  $n$ -й пачки  $m$ -го цикла;  $\psi_{(i,j)}^{(m,n,k)}$  – фаза принятого  $i$ -м каналом сигнала  $j$ -го объекта для  $k$ -го импульса  $n$ -й пачки  $m$ -го цикла;  $\Phi_{p(i)}^{(m,n,k)}(t)$  – результирующий закон модуляции фазы принятого сигнала с индексами  $m, n, k, j$ ;  $F_{\text{зр}}(\cdot), F_3(\cdot), F_{\cos}(\cdot), \chi_3(\cdot), \chi_p(\cdot)$  – специальные функции.

Используя метод синтеза математических моделей с требуемыми свойствами [3], преобразуем данную модель, представив ее в виде двух квадратурных составляющих. Преобразования исходного графа алгоритма реализации полученной модели в соответствии с методикой синтеза ВСРВ [1] позволяют получить следующие результаты.

1. Граф вычислительной структуры (ГВС), приведенный на рисунке.

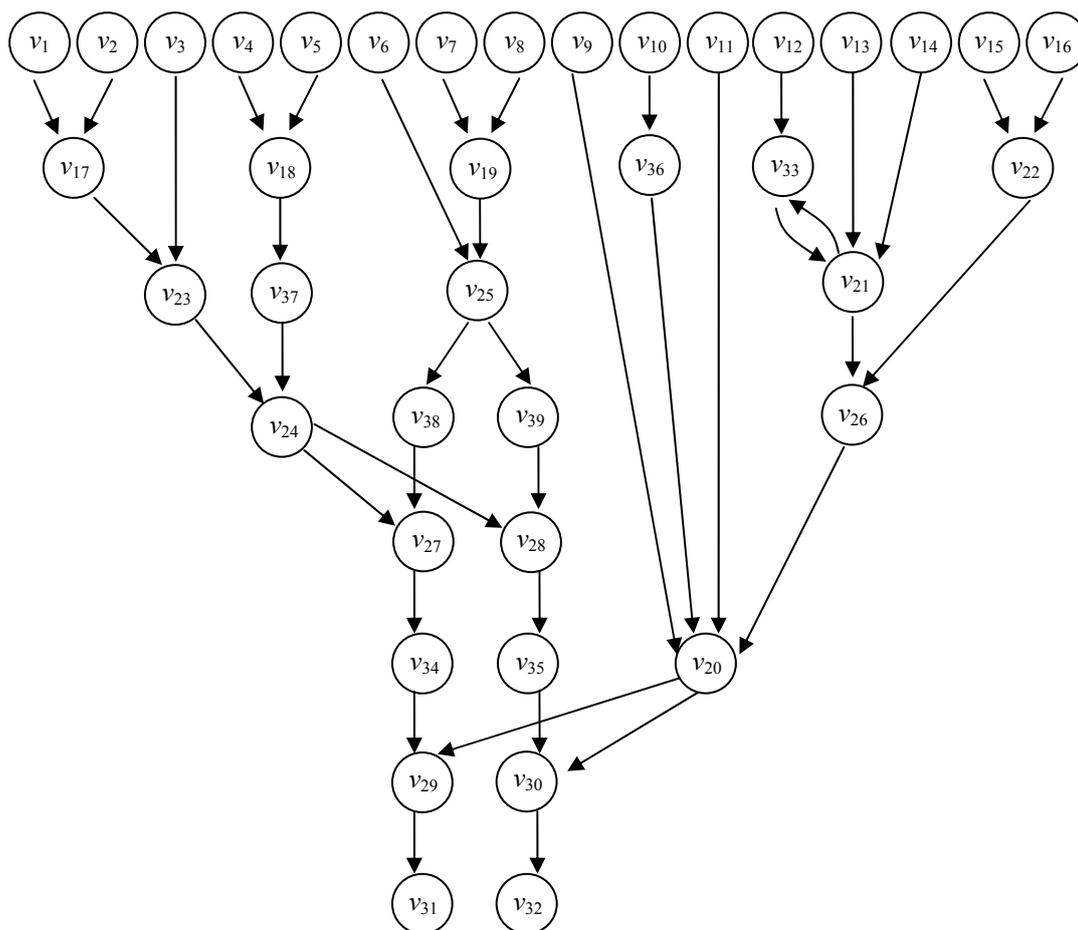
2. Вектор спецификации вершин ГВС:

$\Phi = (\text{Вв. } E_0, \text{ Ген. } Z_{\phi}, \text{ Вв. } K_E, \text{ Вв. } \Delta\alpha, \text{ Вв. } \Delta\beta, \text{ Вв. } \omega, \text{ Вв. } \Delta\omega, \text{ Вв. } \psi, \text{ Вв. } \tau_3, \text{ Вв. } \tau'_3, \text{ Вв. } K_d, \text{ Вв. } t'_{\text{и}}, \text{ Вв. } \Delta T', \text{ Вв. } \Delta T, \text{ Вв. } t_{\text{и}}, \text{ Вв. } \tau_{\text{и}}, *, F_{\text{дн}}, +, \chi_3, t^*, \chi_3, *, \chi_p, *, F_{\cos}, *, F_{\sin}, *, F_{\text{зр}}, *, *, *, \text{Выв. } y_1, \text{ Выв. } y_2)$ . Здесь Вв. – ввод, Ген. – генерация, Выв. – вывод, \* – умножение.

3. Вектор назначения,  $i$ -й элемент которого указывает на функциональное устройство из заданного набора, назначенное  $i$ -й вершиной ГВС.

Формируется также информация, необходимая для управления операционной частью СВУ [1].

Синтезированное СВУ отличается следующими показателями: широкие функциональные возможности, обуславливающие многообразие областей применения; высокая точность моделирования временных характеристик процесса, определяемая быстродействием элементной базы, на которой реализованы ФУ для временных преобразований; высокая степень адекватности моделируемых сигналов реальным благодаря использованию математической модели со свойствами, наиболее полно характеризующими реальные радиосигналы; управление в реальном масштабе времени статическими и динамическими характеристиками путем прямого цифрового управления ФУ.



Граф вычислительной структуры СВУ для моделирования радиосигналов

**Заключение.** Использование специализированных вычислительных средств в составе автоматизированных систем управления, контроля, испытаний, моделирования, обучения и других содействует обеспечению выполнения этими системами своих функций в реальном масштабе времени, повышает точность обработки данных и формирования воздействий на объект исследования, снижает себестоимость систем.

**Литература**

1. Кобайло А. С. Теория синтеза вычислительных систем реального времени. Минск: БГТУ, 2010. 256 с.

2. Кобайло А. С. Особенности представления математических моделей для автоматизации проектирования вычислительных систем реального времени // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. 2009. Вып. XVII. С. 111–114.

3. Кобайло А. С., Пешков А. Т., Фецкович Д. А. Булева алгебра в решении оптимизационных задач. Синтез математических моделей с требуемыми свойствами // Доклады БГУИР. Т. 9, № 7 (53). Минск, 2010. С. 76–82.

*Поступила 19.03.2014*