

## ОПЕРАЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ИТЕРАТИВНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

\* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

\*\* Полтавский национальный технический университет имени Ю. Кондратюка, Киев, Украина

**Анотація.** У статті в рамках гіпотези про фізичну символну систему, спираючись на модифікацію тези Черча-Тюрінга, втілена концепція обчислювально-перетворювального ланцюга в проектних рішеннях ітеративних операційних елементів. Їх відмінною особливістю є поліморфізм інформаційних і керуючих сигналів у поєднанні з аналоговими і цифровими способами функціонування, що мотивує просування подальших досліджень у напрямі формування системи модельних уявлень про хвильові процеси за аналогією з квантовою теорією фізичних процесів.

**Ключові слова:** структурно-аналогові обчислення, фізична символна система, поліморфізм інформаційних і керуючих сигналів, операційні з керованими параметрами елементи, ітерація, неперервно-дискретний дуалізм, інформаційний квантовий потік, інкрементний процес.

**Аннотация.** В статье в рамках гипотезы о физической символной системе, опираясь на модификацию тезиса Черча-Тьюринга, воплощена концепция вычислительно-преобразовательной цепи в проектных решениях итеративных операционных элементов. Их отличительной особенностью является полиморфизм информационных и управляющих сигналов в сочетании с аналоговыми и цифровыми способами функционирования, что мотивирует продвижение дальнейших исследований в направлении формирования системы модельных представлений о волновых процессах по аналогии с квантовой теорией физических процессов.

**Ключевые слова:** структурно-аналоговые вычисления, физическая символная система, полиморфизм информационных и управляющих сигналов, операционные с управляемыми параметрами элементы, итерация, непрерывно-дискретный дуализм, информационный квантовый поток, инкрементный процесс.

**Abstract.** In the context of the physical symbol system hypothesis based on the Church-Turing thesis modification, the concept of computational and converting circuit in the design solutions of iterative operational elements was embodied in the paper. Their distinctive feature is the polymorphism of information and control signals combined with analogue and digital ways of functioning, which motivates the further researches in the field of forming the wave processes models representations system by analogy with the physical processes quantum theory.

**Keywords:** structural-analog computations, physical symbol system, polymorphism of information and control signals, operational with the controlled parameters elements, iteration, discrete-continuous dualism, information quantum flow, incremental process.

### 1. Введение

Информационные процессы, происходящие в природе и технических системах, имеют неперервно-дискретный характер. При анализе информационных процессов в зависимости от уровня и цели рассмотрения одна и та же система может проявляться как непрерывная и как дискретная [1, 2]. Так проявляется корпускулярно-волновой дуализм информационных процессов, обусловленный сложной природой семиотического знака. Законы поведения физической символной системы (ФСС) не могут быть однозначно выведены из законов физики. Согласно тезису Черча-Тьюринга, «каждая конечно реализуемая физическая система может быть полностью продемонстрирована универсальной моделирующей вычислительной машиной, действующей конечными средствами». В рамках модификации этого тезиса расширяется класс вычислимых функций, поскольку объявляются вычислимыми те

функции, которые могут быть воспроизведены реальной физической системой, то есть функции, вычисляемые самой природой [3].

Если выполняется непрерывный анализ, то желательно применять и соответствующее преобразование: непрерывный прием потока данных, непрерывную обработку информационных элементов потока по мере их поступления, непрерывное формирование результата в процессе обработки<sup>1</sup>. Для решения таких задач целесообразна организация процессов инкрементного (по приращениям) преобразования.

## 2. Постановка задачи

При построении информационно-измерительных и вычислительных систем получили распространение два подхода к обработке потоков информационных квантов [4–6].

В первом случае выполняется централизованная обработка, для которой необходимо предварительное преобразование сигналов, снимаемых с датчиков, в цифровую форму (двоичные, как правило, слова) с последующей обработкой полученных кодов на универсальном процессоре. Недостатком такого решения является высокая степень взаимосвязи подсистем при наличии достаточно емкого программного обеспечения, ориентированного на инкрементную обработку информационных потоков [7].

Во втором случае используется распределенная обработка информации, характеризующаяся использованием раздельного оборудования для различных информационных потоков. При этом повышаются производительность информационно-вычислительных комплексов и их надежность, улучшается помехозащищенность, появляется возможность выполнения непрерывной следящей обработки информационных потоков [2, 3, 8].

Вне зависимости от выбранного подхода к обработке потоков данных, интерес представляет полиморфизм информационных и управляющих сигналов, структурно-процедурные принципы организации вычислительного процесса [5, 8].

При первом (централизованном) подходе выполняется прием данных в целом с последующим вычислительным преобразованием, а при втором (инкрементный способ) предусматривается объединение информационных процессов, и обработка сигнала выполняется по мере его изменения (инкрементно) [4, 7, 9].

Во втором случае процессы реализуются с использованием потоковых представлений информации<sup>2</sup>. В дальнейшем в конкретных решениях используются только динамические потоки, в которых какая-либо служебная информация отсутствует.

## 3. Операционные элементы с запрос-ответной дисциплиной обмена данными

Изложенные выше основные положения по организации потоковых ВП-цепей в отношении их структурных компонент нашли отражение в предложенных нами операционных элементах (ОЭ). В них реализованы итеративная схема вычислений и запрос-ответная дисциплина информационного обмена (рис. 1), что позволяет строить различного типа распределенные вычислительные цепи с повышенной отказоустойчивостью [10].

Запрос-ответная дисциплина обмена реализуется путем управления длительностью ВП-процесса за счет расщепления его на две фазы. В первой ОЭ переводится из текущего активного (рабочего) состояния в пассивное (нерабочее, подготовительное), а во второй – в новое активное состояние. В то время, как ОЭ находится в уравновешенном пассивном

---

<sup>1</sup> В последнее время осваивается проведение информационных процессов на квантовом, молекулярном, клеточном уровнях, где уже сами элементы являются носителями непрерывных и непрерывно-дискретных процессов. Для таких элементов с управляемыми параметрами использование процессов непрерывного преобразования представляется естественным.

<sup>2</sup> На структурном уровне под информационным потоком понимается некоторый объем информации, представленный в произвольной форме (аналоговой, импульсной, цифровой), проходящий через какой-либо «срез» (элемент, связь) структуры за единицу времени.

состоянии, внешняя среда осуществляет формирование очередного набора значений информационных сигналов. При завершении этого процесса она выставляет активное значение управляющего сигнала, игнорирующего переход ОЭ в рабочую фазу. Последняя завершается состоянием равновесия ОЭ, соответствующим значениям информационных сигналов, поступивших на его выходы со стороны внешней среды. Введение двух фаз в работу ОЭ позволяет инициировать переход его в новое активное состояние даже в том случае, когда оно совпадает со старым.

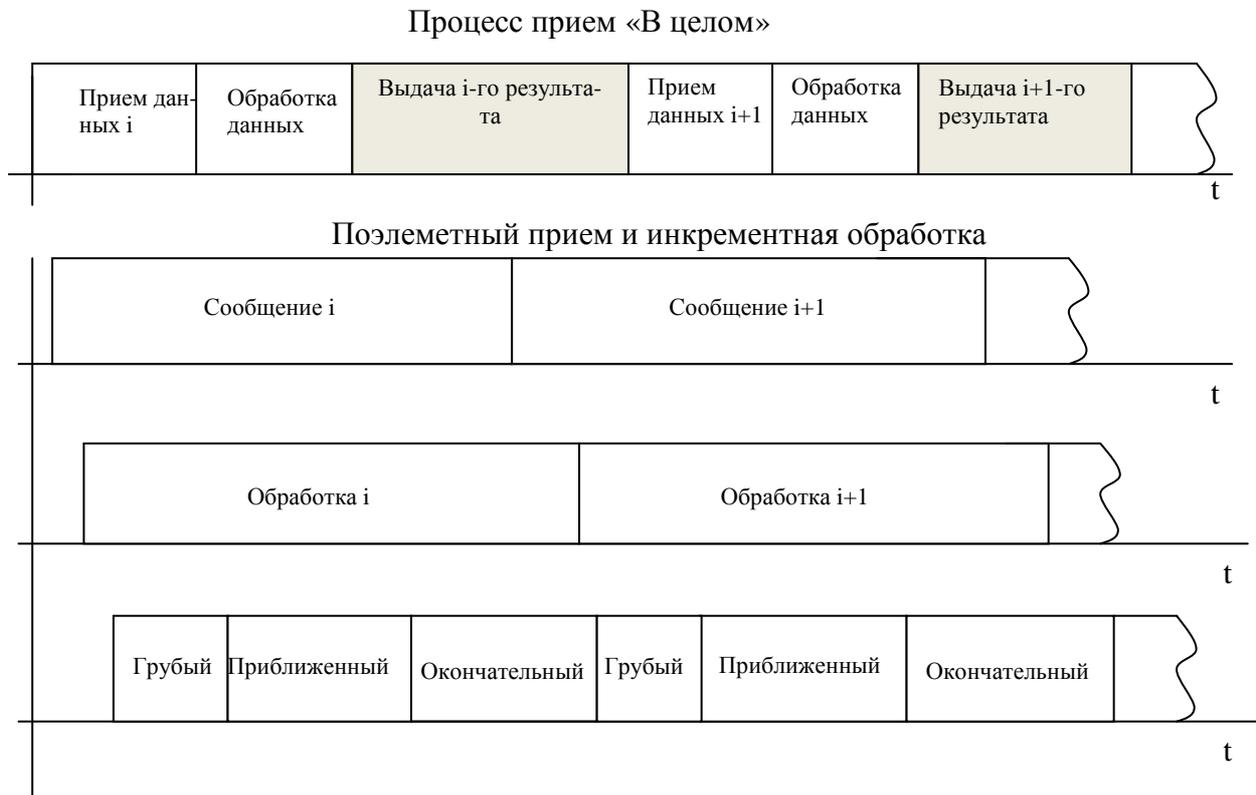


Рис. 1. Взаимодействие во времени процессов получения, обработки и выдачи информации

Граф переходов ОЭ, соответствующий этому описанию взаимодействия с внешней средой, приведен на рис. 2. Здесь  $a$  – управляющий сигнал запроса со стороны внешней среды,  $b$  – управляющий сигнал ответа внешней среде,  $a$  и  $b \in \{0, 1\}$ ;  $D_{i1}, \dots, D_{ij}, \dots, D_{in}$  – информационные сигналы со стороны внешней среды,  $R = \{R_{i1}, \dots, R_{ij}, \dots, R_{in}\}$  – класс активных (рабочих) состояний равновесия ОЭ,  $P$  – пассивное (подготовительное) состояние ОЭ. В согласованной модели ОЭ такт для внешней среды формируется ОЭ, а такт для ОЭ формируется внешней средой, то есть точно так же, как в согласованной модели асинхронного автомата [11]. Если ОЭ готов к выдаче очередного значения результата преобразования, то есть осуществляемый им ВП-процесс завершен, и он находится в одном из состояний  $R_{ij}$  равновесия, то выдается единичное значение сигнала готовности  $b$  внешней среде. При этом сигнал запроса  $a$  также имеет единичное значение, подтверждающее подачу на ОЭ соответствующего состоянию  $R_{ij}$  набора данных  $D_{ij}$ . Таким образом, рабочая фаза ОЭ начинается набором значений управляющих сигналов  $a = 1$  и  $b = 0$  и завершается набором  $a = 1$  и  $b = 1$ .

В активном состоянии ОЭ находится до тех пор, пока со стороны внешней среды не поступит нулевое значение сигнала  $a$ , свидетельствующее о восприятии внешней средой сформированного ОЭ результата вычислительного преобразования. Поэтому набором зна-

чений управляющих сигналов  $a = 0$  и  $b = 1$  начинается фаза подготовительного (пассивного) состояния ОЭ, которая завершается переходом ОЭ в состояние Р набором управляющих сигналов  $a = b = 0$ .

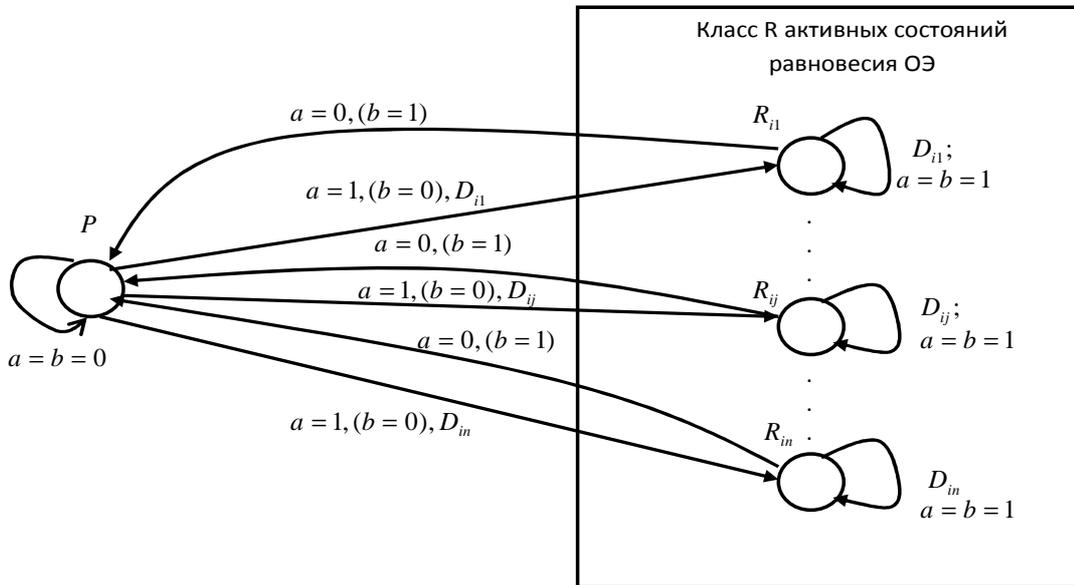


Рис. 2. Граф переходов согласованной модели ОЭ

Значения информационных сигналов при этом безразличны. Активизация ОЭ осуществляется подачей очередного единичного значения сигнала  $a$  с соответствующими ему очередными значениями информационных сигналов и т.д.

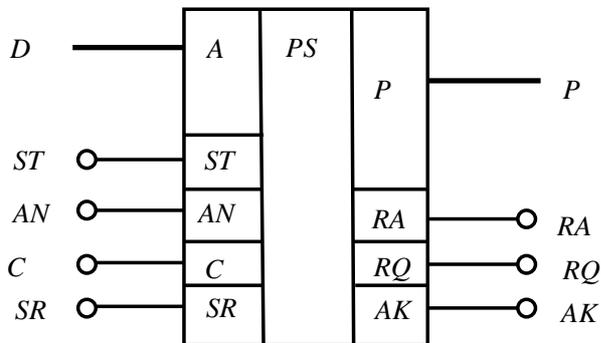


Рис. 3. Условное обозначение ОЭ с итеративной организацией ВП-процесса и запрос-ответной дисциплиной обмена данными

На примере ОЭ [12], реализующего операцию умножения по итеративной схеме и осуществляющего информационный обмен в соответствии с изложенной выше согласованной моделью, более детально рассмотрим организацию ВП-процесса. На рис. 3 приведено условное обозначение ОЭ. Жирными линиями обозначены цепи информационных сигналов, тонкими – управляющих. Здесь  $D$  – шина операнда (операндов),  $P$  – шина результата,  $ST$  – вход пуска,  $AN$  – вход приема ответа,  $C$  – вход тактирования,  $SR$  – вход установки в

исходное состояние,  $RA$  – выход готовности данных (результата преобразования),  $RQ$  – выход запроса данных,  $AK$  – выход квитирования.

На рис. 4 приведена граф-схема последовательно-параллельной структуры управления ОЭ с учетом описанной выше (рис. 2) дисциплины обмена данными с внешней средой в рамках согласованной модели ОЭ. Под структурой управления ОЭ здесь понимается совокупность базовых структурных единиц – операторов – и специальных управляющих примитивов, позволяющих сформировать последовательно-параллельный ВП-процесс. В число последних входят двойные горизонтальные полочки, являющиеся специальными указателями, отмечающими начало и конец параллельного сегмента графа управления.

ВП-процесс продвигается до начала сегмента, изображаемого верхней полочкой с одним входом, после чего расщепляется на столько копий, сколько входных линий имеет нижняя полочка. Каждый из ВП-подпроцессов ветвей протекает независимо от других и,

достигая конца ветви, изображаемой входной линией верхней полочки, останавливается, ожидая, пока все остальные ВП-подпроцессы в сегменте не достигнут конца сегмента. В конце сегмента все процессы сливаются в один, что изображается одной выходной линией соответствующей нижней полочки.

В исходное состояние ОЭ с именем  $PS$  (в дальнейшем просто  $PS$ ) устанавливается единичным сигналом  $SR$  системного сброса (бл. 1). Это состояние совпадает с заключительным состоянием  $P$  (рис. 2) подготовительной фазы работы  $PS$ . При этом на выходах формируются сигналы  $RA=0$ ,  $RQ=1$  и  $AK=0$ , свидетельствующие о нахождении  $PS$  в режиме ожидания сигнала пуска  $ST$ . Если неисправность  $PS$  не выявлена (бл. 2, 3), то возможен его запуск;  $f(S)$  – оператор выявления неисправности  $PS$ ,  $ER$  – признак неисправности,  $S$  – состояние  $PS$ . По сигналу  $ST$ , поступающему на  $PS$  в случае готовности данных  $D$  на его информационном входе  $A$ , начинается рабочая фаза ВП-процесса. На выходе квитирования формируется единичный импульсный сигнал  $AK$  (бл. 5, 6). Этот сигнал подтверждает прием данных по информационному входу  $A$  (рассматриваемому

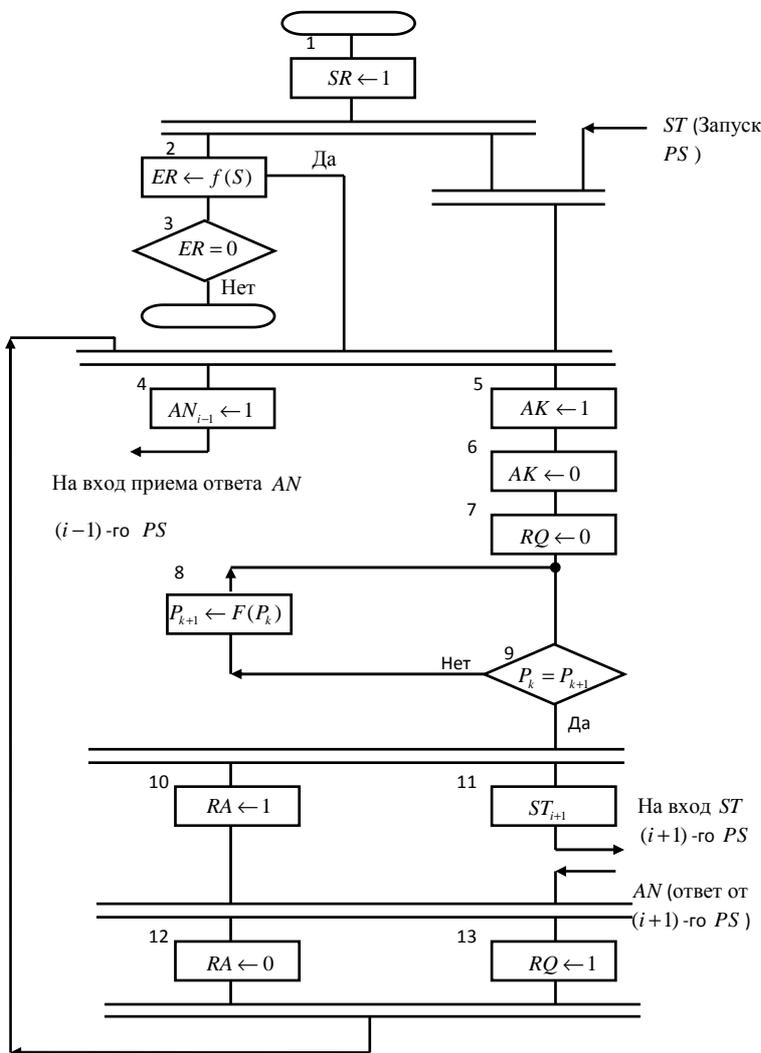


Рис. 4. Граф-схема последовательно-параллельной структуры управления ОЭ с запрос-ответной дисциплиной обмена

операционным элементом дисциплина обмена данными  $D$ ); приемнику информации присвоен номер  $i+1$ . На этом завершается рабочая фаза ВП-процесса. При поступлении сигнала ответа о приеме данных с  $i+1$ -го элемента  $PS$  на вход  $AN$   $i$ -го элемента  $PS$  и вы-

$PS$  присвоен номер  $i$ ) со стороны источника информационного сигнала. В качестве последнего может быть, например, такой же по организации управления операционный элемент  $PS$  (предыдущему элементу  $PS$  присвоен номер  $i-1$ ) (бл. 4). По сигналу квитирования  $AK$  обнуляется сигнал запроса  $RQ$  (бл. 7), после чего элемент  $PS$  переходит в итеративный режим ВП-процесса в соответствии с функцией преобразования  $P_{k+1} = F(P_k)$  ( $F$  – одноточечная итерационная функция,  $k$  – порядковый номер итерации,  $P$  – результат вычислительного преобразования) (бл. 8). Итерационный процесс завершается при истинном значении предиката  $P_k = P_{k+1}$  (бл. 9). Тогда на выходе готовности данных формируется сигнал  $RA=1$  (бл. 10), свидетельствующий о готовности передачи результата преобразования входных данных в приемник информации (бл. 11) (предполагается, как и в случае источника информации, однотипная с рассматриваемым

полнении условия готовности  $RA = 1$  (бл. 10) осуществляется переход элемента в очередную подготовительную фазу работы, когда  $RA = 0 \wedge RQ = 1$  (бл. 12). Нормальный режим функционирования операционного элемента  $PS$  прекращается с выходом на аварийный останов (бл. 3), сопровождающийся соответствующим признаком неисправности.

На рис. 5 представлена функциональная схема ОЭ  $PS$  с итеративной организацией ВП-процесса. Этот ОЭ наряду с операцией умножения реализует оператор сглаживания, обеспечивающий повышенную помехоустойчивость ОЭ в информационном канале к единичным сбоям.

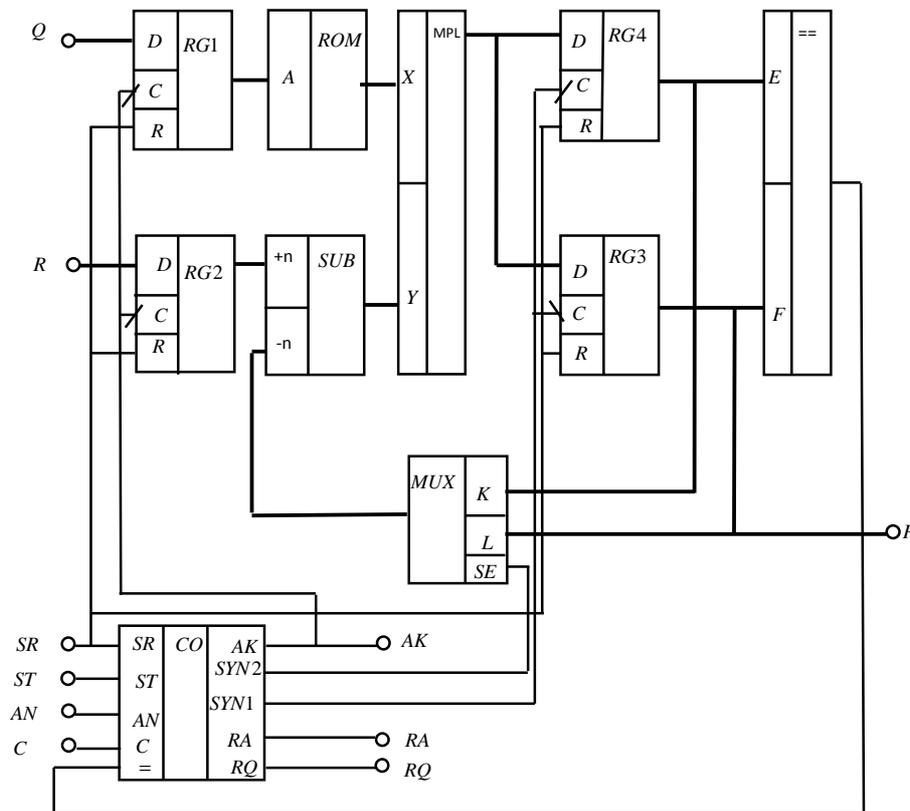


Рис. 5. ОЭ с итеративной организацией ВП-процесса и запросоответной дисциплиной обмена данными, реализующей операцию умножения

этой цепи имеет вид [4, 7]

$$U = \frac{\theta}{1-\theta}(E-U), \quad (1)$$

где  $E$  – потенциал вершины 1, вершина 3 считается заземленной, потенциал вершины 2, проводимости ОЭ предполагаются равными, то есть  $G_1 = G_2$ ,  $\theta$  – относительная длительность управляющего ШИМ-сигнала.

Предикат, истинное значение которого определяет уравновешенное состояние ВП-цепи и, следовательно, окончание процесса вычислительного преобразования, имеет вид

$$I_1 = I_2, \quad (2)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – соответственно средние значения токов, протекающих через операционные элементы ВП-цепи. Рекуррентное соотношение вида

$$P_{k+1} = \frac{Q}{1-Q}(R-P_k), \quad (3)$$

На рис. 6 изображена схема блока управления ОЭ, реализующего запросоответную дисциплину обмена данными в соответствии с последовательно-параллельной структурой управления (рис. 4), временные диаграммы его работы представлены на рис. 7.

Прототипом (в смысле совпадения функциональных моделей ( $F$ -моделей)) этого варианта реализации ОЭ послужила ВП-цепь на ОЭ с управляемой проводимостью прямым и инверсным ШИМ-сигналами [3, 5]. В причинно-следственной форме  $F$ -модель

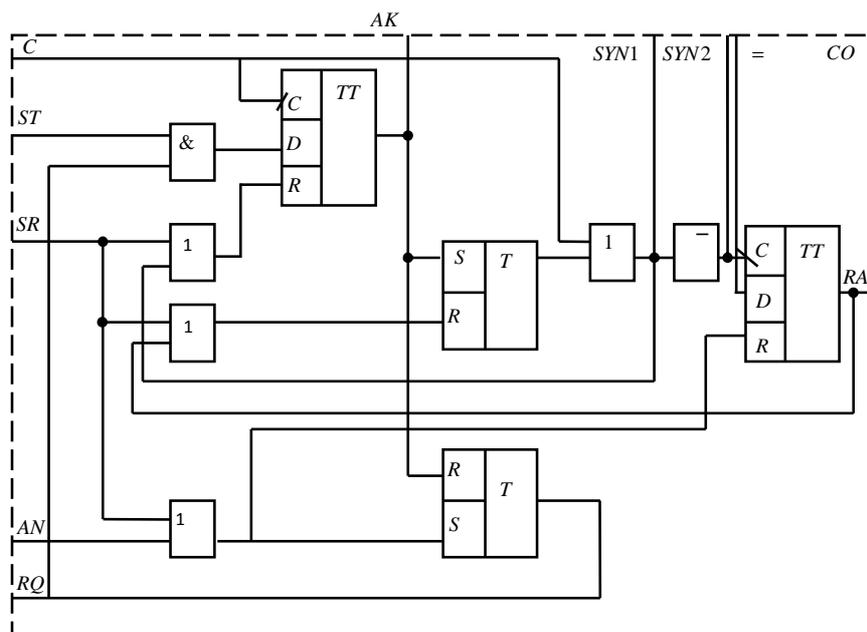


Рис. 6. Блок управления ОЭ с итеративной организацией ВП-процесса и запрос-ответной дисциплиной обмена данными

определенное над полем переменных  $\{R, Q, P\}$ , является подобным управлением (1) при следующих соответственных переменных  $E \leftrightarrow R, \theta \leftrightarrow Q, U \leftrightarrow P$ . Здесь  $R$  – множитель,  $Q$  – множимое,  $P$  – произведение,  $k$  – номер шага итерации; предполагается, что  $0 \leq R < 1, 0 < Q < 0,5$ , что обеспечивает сходимость одноточечной итерационной схемы вычислений (3). В качестве предиката, фиксирующего окончание ВП-процесса, выбирается

условие

$$P_{k+1} = P_k = P. \quad (4)$$

Очевидно, что при обращении равенства (4) в тождество реализуется операция умножения

$$P = QR. \quad (5)$$

Благодаря свойству самоисправляемости метода итераций, подобная организация ВП-процесса обеспечивает не критичность значения произведения к разовым сбоям в значениях  $Q$  и  $R$ . Такие сбои могут привести лишь к возрастанию времени формирования результата преобразования, но не его неверному значению [10, 12].

Поясним работу ОЭ. Его операционная часть (рис. 5), очевидно, соответствует  $F$ -модели (3), (4), которая задает как набор операционных компонентов, так и информационные связи между ними. Выходные операнды в регистрах  $RG1$  и  $RG2$ , произведение – в регистре  $RG3$ . Регистр  $RG4$  служит для хранения значения произведения на соседнем шаге итерации. Компаратор, выполненный в виде схемы сравнения кодов, вычисляет предикат (4). Вычитатель  $SUB$  формирует разность  $(P - P_k)$  (3), которая с помощью множителя  $MPL$  умножается на код  $Q/(1-Q)$ . Последний формируется с помощью постоянного запоминающего устройства ROM. Мультиплексор коммутирует на вычитающий вход вычитателя соответствующее значение очередного приближения произведения.

Хронологическая упорядоченность функционирования операционных компонентов обеспечивается блоком управления  $CO$ , реализующим граф управления на рис. 4.

Итеративный процесс будет продолжаться до тех пор, пока на выходе схемы сравнения не сформируется единичный сигнал, свидетельствующий о выполнении равенства  $P = P_{k+1} = P_k = QR$ . Единичный сигнал с выхода схемы сравнения поступит на вход «=» блока управления, в котором выход  $RA$ , а, следовательно, и выход  $RA$  ОЭ перейдет в единичное состояние. Это соответствует завершению рабочей фазы ОЭ (ОЭ находится в одном из состояний равновесия  $R_{ij}$ ) (рис. 2).

Он готов выдать результирующий код произведения с шины  $P$  в приемник информации.

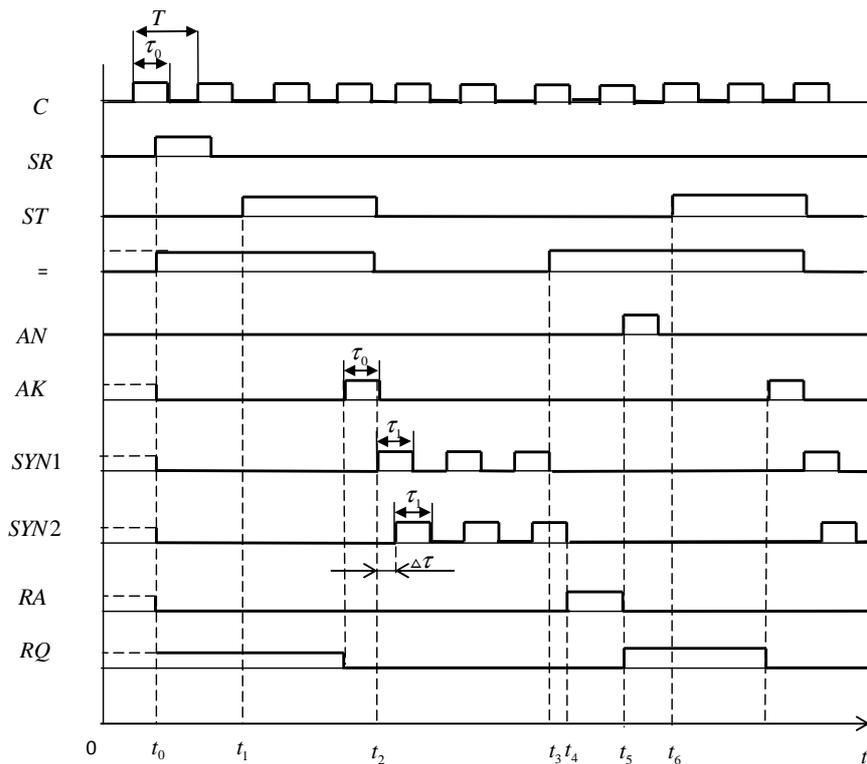


Рис. 7. Временные диаграммы работы блока управления ОЭ с итеративной организацией ВП-процесса и запрос-ответной дисциплиной обмена данными

После передачи информации в приемник последний инициирует на своих выходах единичный сигнал о приеме данных, который поступает на вход  $AN$  ОЭ. По этому сигналу ОЭ возвращается из активного состояния  $R_{ij}$  в пассивное. Он готов к приему новых данных. При этом полученное значение произведения сохраняется в регистрах  $RG3$  и  $RG4$  и может быть использовано в следующем цикле вычисления как первое приближение результата преобразования. Тем самым обеспечивается высокое быст-

родействие устройства при обработке малых приращений сомножителей.

Рассмотренная организация ВП-процесса свидетельствует о возможности реализации используемыми в аperiodической схемотехнике средствами [11] самодиагностики ОЭ. Для этого вводится так называемая внешняя временная метрика посредством подключения к ОЭ специальной логической схемы индикации отказа, фиксирующей нарушение условий выработки истинного значения предиката, отражающего состояние цепи (уравновешенное или неуравновешенное).

## 5. Выводы

1. В рамках гипотезы о физической символьной системе (ФСС) сформулирована ключевая для построения потоковых сред распределенной обработки данных проблема – связь теоретико-модельной семантики среды с её процедурной (процессной) семантикой, определяющей конкретные способы (и соответствующие проектные решения) преобразования данных по запросам к таким структурам. К решению этой проблемы привлечены потоковые методы представления и рекуррентные методы обработки данных.
2. Опираясь на модификацию тезиса Черча-Тьюринга и гипотезу о ФСС, воплощена концепция вычислительно-преобразовательной цепи (ВП-цепи) в проектные решения итеративных операционных элементов с запрос-ответным механизмом взаимодействия на цифровой элементной базе.
3. Для таких вычислительных процессов продемонстрированы глубокие параллели с аналоговыми электрическими моделями.
4. Отличительной особенностью предложенных проектных решений по функциональному преобразованию является полиморфизм информационных и управляющих сигналов в со-

четании с аналоговыми и цифровыми способами функционирования, что мотивирует продвижение дальнейших исследований в направлении формирования системы представлений о волновых процессах с привлечением аналогий с квантовой теорией физических процессов [13].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пухов Г.Е. Автоматизированные аналого-цифровые устройства моделирования / Пухов Г.Е., Аристов В.В., Самойлов В.Д. – Киев: Техника, 1974. – 324 с.
2. Фейнман Р.П. Моделирование физики на компьютерах / Р.П. Фейнман // Сборник «Квантовый компьютер и квантовые вычисления». – Ижевск, 1999. – Вып. 2. – С. 53 – 95.
3. Герасимов И.В. Гибридные вычислительные устройства для переработки цифровой и время-импульсной информации / И.В. Герасимов // Труды VII междунар. конгресса АИСА. – Прага, 1973. – Т. 2. – С. 237 – 240.
4. Герасимов И.В. Вычислительно-преобразовательные цепи для параллельной обработки информации / И.В. Герасимов // Распараллеливание обработки информации: Тезисы докладов V школы-семинара. – Львов, 1985. – С. 74 – 76.
5. Герасимов И.В. Мостовая время-импульсная квазианалоговая модель второго рода для n-мерной системы линейных алгебраических уравнений / И.В. Герасимов // Кибернетика. – 1973. – № 6. – С. 38 – 42.
6. Герасимов И.В. Теория, проектирование и применение вычислительно-преобразовательных цепей (синтез и реализация): дис. ... доктора техн. наук / Герасимов И.В. – Л.: ЛЭТИ, 1986. – 420 с.
7. Время-импульсные вычислительные устройства / В.Б. Смолов, Е.П. Угрюмов, А.Б. Артамонов [и др.]. – Л.: ЛЭТИ, 1983. – 288 с.
8. Каляев И.А. Семейство многопроцессорных вычислительных систем с динамически перестраиваемой архитектурой / И.А. Каляев, И.И. Левин // Материалы Междунар. научн. конф. «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ 2008), (Россия, г. Санкт-Петербург, 29–31 января 2008 г.). – Санкт-Петербург, 2008. – С. 118 – 123.
9. Герасимов И.В. Методы и средства обработки сигналов на базе программируемых БИС: учебн. пособ. / Герасимов И.В. – Л., 1991. – 67 с.
10. А.с. 1193668 СССР. Устройство для умножения / И.В. Герасимов, А.А. Биушкин. – Опубл. 23.11.85, Бюл. № 43. – 4 с.
11. Аперiodические автоматы / А.Г. Астановский, В.И. Варшавский, В.Б. Мараховский [и др.]; под ред. В.И. Варшавского. – М.: Наука, 1976. – 424 с.
12. А.с. 1388852 СССР. Устройство для умножения / А.А. Биушкин, А.А. Валов, И.В. Герасимов. – Опубл. 15.04.88, Бюл. № 14. – 7 с.
13. Герасимов И.В. Эволюция проблемы структурно-аналоговых вычислений: квантовый компьютинг / И.В. Герасимов, Н.М. Сафьянников // Вестник молодых ученых. – (Серия «Технические науки»). – 2003. – № 6. – С. 3 – 16.

*Стаття надійшла до редакції 07.10.2013*