

РЕКУРСИВНЫЕ КОНВЕЙЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ – ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ

УДК 519.86

Борис Васильевич Куприянов,
к.т.н., Научный сотрудник института
проблем управления РАН
Тел.: (903) 626-86-25
Эл. почта: kuprianovb@mail.ru.

В статье рассматривается формальная модель рекурсивных конвейерных процессов. Описываются и иллюстрируются основные свойства и характеристики данного вида процессов. На основании данных свойств осуществляется разбиение процессов на классы.

Ключевые слова: численное моделирование, конвейер, календарное планирование, организация производства, рекурсивные функции, APS-системы.

Boris V. Kupriyanov,
PhD in Technical Sciences, Research
Associate of the Institute of control sciences of RAS
Тел.: (903) 626-86-25
E-mail: kuprianovb@mail.ru

RECURSIVE CONVEYOR PROCESSES – THE MAIN PROPERTIES AND CHARACTERISTICS

In the article the formal model of recursive conveyor processes is considered. The main properties and characteristics of this type of processes are described and illustrated. Based on these properties splitting processes into classes is carried out.

Keywords: numerical modeling, conveyor, calendar planning, organization of production, recursive functions, APS systems.

1. Введение

В рамках теории организации производства [1–3] в свое время были исследованы конвейерные процессы и разработан соответствующий теоретический аппарат. Он позволял вычислять технические характеристики конвейерных процессов и осуществлять оптимизационные преобразования. К основным характеристикам конвейерного процесса относятся его производительность и связанное с ней время выполнения некоторого объема работ. Конвейерный процесс ассоциировался с некоторой производственной технологической линией серийного, поточного или массового производства. Для описания таких процессов достаточно было использования последовательных, параллельных и параллельно-последовательных схем. Серийное, массовое и поточное производства разрабатываются с регулярной технологической структурой. В таких конвейерах отсутствуют переходные процессы и их характеристики описываются аналитическими выражениями.

Модели конвейерных процессов, в той или иной модификации, широко используются для решения различных прикладных задач. Конвейерные процессы существуют не только в производстве, но и в вычислительных процессах [3–5]. В настоящее время теория составления производственных расписаний воплощается в таких информационных системах как ERP – системы управления предприятием, MES – системы управления производственными процессами и APS – системы составления производственных расписаний [6–8]. Практически все известные автору системы используют в качестве модели процесса – диаграммы Ганта. В дальнейшем, исходя из того или иного дополнительного набора данных используются различные эвристические методы составления расписания.

В статьях [9–11] рассматривается моделирование класса процессов, имеющих конвейерную природу. В статье [12] рассматриваются приложения данной модели к описанию процессов в производстве, теории расписаний и вычислительных процессах. Оно имеет следующие отличия от модели конвейера в теории организации производства:

1. Процесс описывается не параллельно-последовательной схемой, а ациклическим ориентированным графом, вершинами которого могут быть функциональные операции или спусковые функции.

2. Числовые характеристики процесса определяются не аналитически, а рекуррентными выражениями.

Рекурсивный конвейерный процесс описывается расписанием выполнения операций, в котором время завершения выполнения каждой операции вычисляется с помощью рекурсивной функции вида

$$f_k^n = R(f_{k-1}^n, f_k^p, \dots, f_k^q, t_n),$$

где

- n – номер операции конвейера,
- k – номер выполняемого цикла,
- t_n – время выполнения операции с номером n ,
- f_k^p – время завершения выполнения операции p на k -м цикле,
- $p \dots q$ – номера операций непосредственно предшествующих операции с номером n ,
- R – некоторая рекурсивная функция.

В данной статье осуществляется достаточно формальное и систематическое описание модели конвейерных процессов. Подробно рассматриваются их свойства. Описывается набор характеристик, которые позволяют достаточно полно описывать конвейерные процессы, чтобы их использовать для описания реальных процессов, анализировать и оптимизировать

их и осуществлять вычисление характеристик. Описанный класс моделей характеризуется тем, что для него можно в статике с помощью структурного анализа вычислить основные характеристики: производительность, время выхода процесса в стационарный режим и т.п.

2. Модель конвейера

Ниже приводится формальное определение модели рекурсивного конвейерного процесса. Данная модель описывает изменение характеристик конвейерного процесса во времени.

Конвейером является конечный ориентированный связный ациклический граф с несколькими начальными вершинами и одной конечной. $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – множество вершин графа. Будем считать, что $\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ – множество начальных вершин ($1 \leq m < n$), а a_n – конечная (или завершающая) вершина.

Каждая вершина графа относится к некоторому типу вершин. Тип вершины графа, с одной стороны связан с некоторым реальным моделируемым объектом, а, с другой стороны, определяет вид рекурсивной функции, соответствующей данной вершине графа. Перечислим типы вершин и их смысловое обозначение:

- s – простая операция;
- l – линейный конвейер;
- and – спусковая функция, определяемая предикатом and ;
- mul – спусковая функция мультипликации операций;
- div – спусковая функция редуцирования операций;
- put – спусковая функция раздачи;
- get – спусковая функция приема.

Далее эти функции будут подробно описаны. Здесь лишь отметим, что операции типа s и l характеризуются временем выполнения. Спусковые функции имеют нулевое время выполнения.

Исходя из свойств связного ациклического графа каждая вершина графа является завершающей для некоторого связного ациклического подграфа. Поэтому далее мы приведем определения связанные с операциями конвейера, которые одновременно будут относиться к

конвейеру, для которого данная операция является завершающей.

1. Определение 1. *Номером цикла k ($k \geq 0$) выполнения операции конвейера (конвейера) назовем порядковый номер экземпляра выполнения операции в процессе функционирования конвейера.*

Номер цикла не имеет размерности.

Определение 2. Будем считать, что *фаза начала k -го цикла a_i -ой операции конвейера (конвейера)* есть время начала выполнения k -го цикла a_i -ой операции конвейера и будет обозначаться как h_i^k , где $1 \leq i \leq n$ и $k \geq 0$.

Определение 3. Будем считать, что *фаза окончания (или просто фаза) k -го цикла a_i -ой операции конвейера (конвейера)* есть время окончания выполнения k -го цикла a_i -ой операции конвейера и обозначим ее как f_i^k , где $1 \leq i \leq n$ и $k \geq 0$.

Между фазами начала и окончания выполнения операции a_i следующая связь:

$$f_i^k = h_i^k + t_i,$$

где t_i – время выполнения операции a_i .

Фазы начала и окончания выполнения операции имеют размерности единицы времени.

Определение 4. *Интервалом k -го цикла a_i -ой операции конвейера (конвейера) d_i^k (для $k \geq 1$) назовем продолжительность времени между моментами окончаний a_i -ой операции в k -ом и $(k - 1)$ -ом циклах:*

$$d_i^k = f_i^k - f_i^{k-1}.$$

Интервал операции определяет отрезок времени между моментами завершения выполнения этой операции в соседних циклах.

Определим функцию $pred(a_i)$ для $a_i \in A$, вычисляющую множество вершин графа, непосредственно предшествующих вершине a_i , т.е.

$$pred(a_i) = \{a_j | 1 \leq j \leq n \text{ и } (a_j, a_i) \in E\}$$

3. Описание конвейерных процессов с помощью рекурсивных функций

В данном разделе будут описаны типы вершин конвейера и связанное с ними рекурсивное определение

временных процессов. Описание будет представлено в трех разделах:

1) Графическое представление операции и соответствующая прикладная интерпретация.

2) Пример временной диаграммы с использованием данного типа операции.

3) Рекурсивное определение значения фазы операции в зависимости от характеристики операции и значения фаз предшествующих операций.

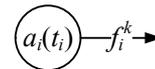
Каждая операция представлена с входной дугой, если она есть (т.е. вершина не начальная) и выходной. С каждой входной дугой связано значение фазы предшествующей операции, если дуга выходная, то значение фазы данной операции. Значение фазы определяется для некоторого k -го цикла выполнения операции. Предполагается, что конвейер начинает функционирование в момент времени равный нулю.

Простая операция



Простая операция a_i ассоциируется с некоторой производственной операцией реального конвейера и характеризуется временем выполнения t_i , которое является постоянным.

Если операция является начальной ($i \leq m$), то она имеет только выходную дугу

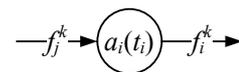


В этом случае рекурсивные формулы для вычисления фазы операции выглядят следующим образом

$$f_i^0 = t_i \text{ для } (1 \leq i \leq m);$$

$$f_i^k = f_i^{k-1} + t_i \text{ для } (1 \leq i \leq m, k \geq 1).$$

Если операция не является начальной



То зависимость фазы операции от входной фазы определяется следующими формулами

$$f_i^0 = f_j^0 + t_i \text{ для } (i > m);$$

$$f_i^k = \max(f_j^k, f_i^{k-1}) + t_i \text{ для } (i > m, k \geq 1).$$

На рис. 1 представлена временная диаграмма для конвейера из двух операций.

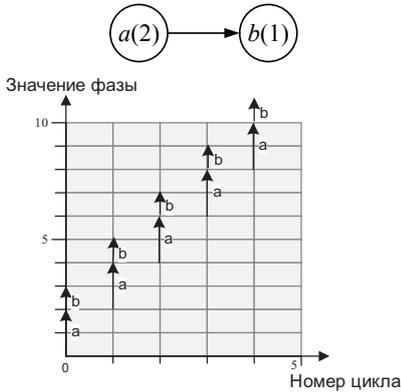


Рис. 1. Временная диаграмма конвейера из двух операций

Линейный конвейер

$$a_i(F_i; t_i)$$

Линейный конвейер отличается от простой операции тем, что у него задается фаза нулевого цикла F_i .

Если операция является начальной

$$a_i(F_i; t_i) \rightarrow f_i^k \rightarrow$$

то значение фазы вычисляется по следующим формулам

$$f_i^0 = F_i \text{ для } (1 \leq i \leq m);$$

$$f_i^k = f_i^{k-1} + t_i \text{ для } (1 \leq i \leq m \text{ и } k \geq 1).$$

Если операция не является начальной

$$\rightarrow f_j^k \rightarrow a_i(F_i; t_i) \rightarrow f_i^k \rightarrow$$

В этом случае

$$f_i^0 = f_j^0 + F_i \text{ для } (i > m);$$

$$f_i^k = \max(f_j^k, f_i^{k-1}) + t_i \text{ для } (i > m, k \geq 1).$$

На рис. 2 представлена временная диаграмма для конвейера из двух операций.

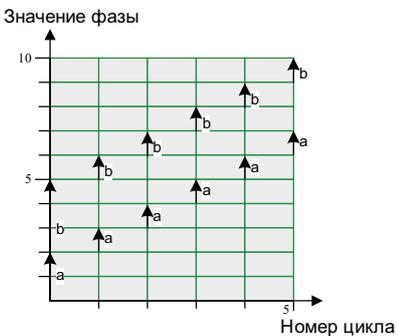
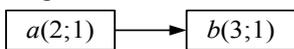
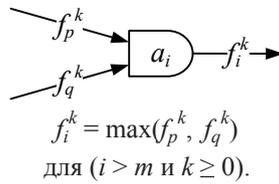


Рис. 2. Временная диаграмма конвейера, состоящего из двух линейных конвейеров

Спусковая функция – логическое and

Данная спусковая функция запускает выполнение k -го цикла следующей за ней операции после того как завершится выполнение k -го цикла обеих операций, предшествующих данной функции.



Пример временной диаграммы конвейера со спусковой функцией *and* представлен на рис. 3.

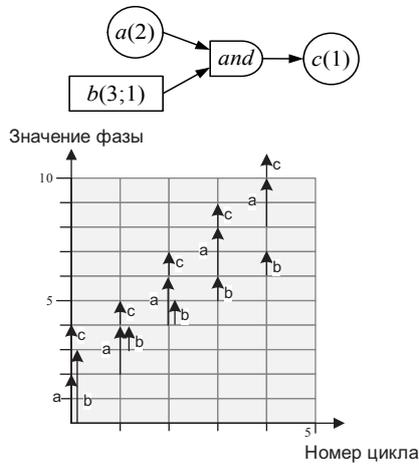
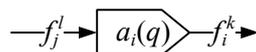


Рис. 3. Временная диаграмма конвейера со спусковой функцией *and*

Спусковая функция повторения операций mul

Данная спусковая функция осуществляет многократный запуск последующей за ней операции на однократное завершение предшествующей операции. Количество запусков указывается в функции и является константой равной q .



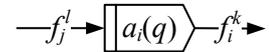
$$f_i^k = f_j^l, \text{ где } l = [k/q] \text{ для } (i > m; k, l \geq 0; q \geq 1)$$

На рис. 4 представлен пример конвейера с использованием функции *mul* и временная диаграмма.

Редукция повторения операций div

Данная спусковая функция обратная к предыдущей. Она запускает

ет выполнение последующей за ней операции после нескольких выполнений предшествующей. Количество выполнений является константой q , указанной в функции.



$$f_i^k = f_j^l, \text{ где } l = (k + 1) * q - 1 \text{ для } (i > m; k, l \geq 0; q \geq 1);$$

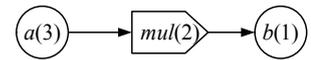


Рис. 4. Временная диаграмма для конвейера с функцией *mul*

На рис. 5 представлен пример конвейера с использованием функции *div* и временная диаграмма.

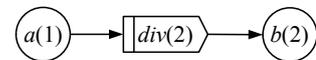
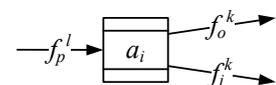


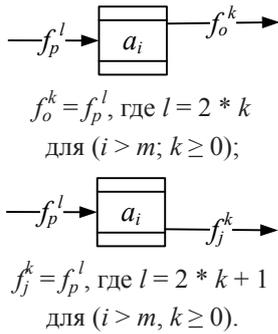
Рис. 5. Временная диаграмма конвейера со спусковой функцией *DIV*

Функция раздачи get

Данная функция по четным циклам запускает верхнюю операцию i , а по нечетным операцию j . Функция имитирует раздачу на две операции с одного потока.



Данную функцию удобно представить в виде двух.



На рис. 6 представлен пример конвейера с использованием функции *get* и временная диаграмма.

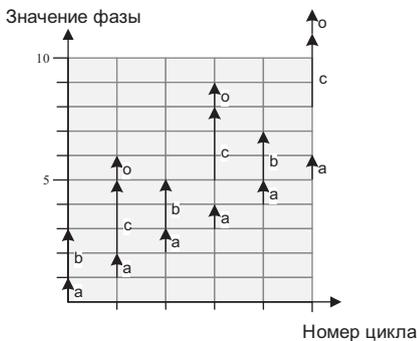
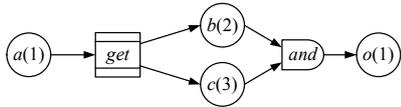
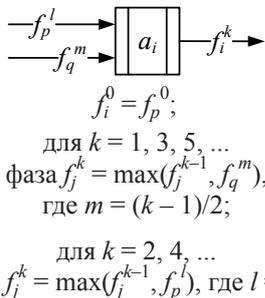


Рис. 6. Временная диаграмма конвейера с спусковой функцией *get*

Функция приема put

Функция приема является обратной к функции раздачи. Она сливает два потока в один, принимая управление то с верхнего потока, то с нижнего. Данная функция имитирует прием на одну операцию с двух потоков.



На Рис. 7 представлен пример модели конвейера с спусковой функцией *put* и соответствующая ему временная диаграмма.

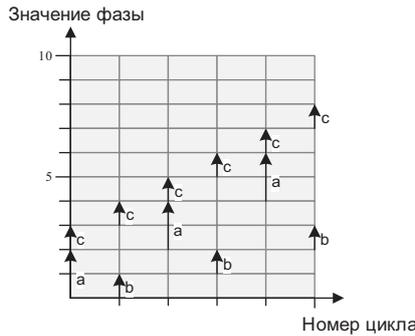
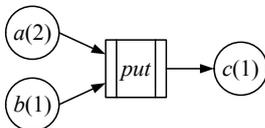


Рис. 7. Временная диаграмма конвейера с спусковой функцией *put*

Определение. Будем называть словом *операция* простую операцию или линейный конвейер. Остальные объекты будут относиться к классу спусковые функции.

4. Свойства и характеристики рекурсивного конвейерного процесса

В данном разделе рассмотрим основные свойства рекурсивного конвейерного процесса. Эти знания позволяют вычислять характеристики процессов данного класса.

Свойство 1. Для каждой операции конвейера функция фазы этой операции является монотонной функцией, т.е. для любой операции $i(1 \leq i \leq n)$ и для любого номера цикла $k \geq 0$ выполняется неравенство

$$f_i^k \leq f_i^{k+1}.$$

Данное свойство вытекает непосредственно из определения рекурсивных функций для всех типов операций.

Определение. Дискретная функция $R(k)$ будем называть линейной, если множество ее значений лежит на некоторой прямой.

Свойство 2. Фаза простой операции и линейного конвейера являются линейными функциями.

Рассмотрим линейный конвейер, т.к. простая операция является частным случаем. Пусть у нас имеется линейный конвейер

$$L(F; d)$$

Временная диаграмма для данного конвейера будет иметь вид, представленный на рис. 8. Очевидно, что формулу для вычисления фазы конвейера L и номера цикла

k можно представить следующим образом

$$f_L^k = F + d \cdot k.$$

Это уравнение прямой.

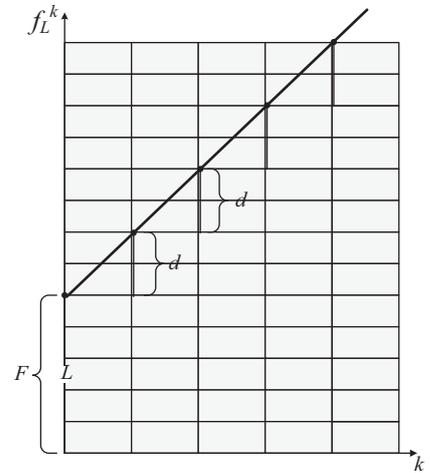


Рис. 8. Временная диаграмма линейного конвейера

Свойство 2. Операции конвейера, в общем случае, могут выполняться с разной частотой. Рассмотрение примера с некоторыми спусковыми функциями приводит к понятию частоты выполнения операции. Так в примере на Рис. 4 видно, что на каждое выполнение операции a приходится 2 выполнения операции b . Если на оси нумераций цикла для каждой операции ввести отдельную шкалу, как это представлено на Рис. 9, то масштабы этих шкал демонстрируют разность частот.

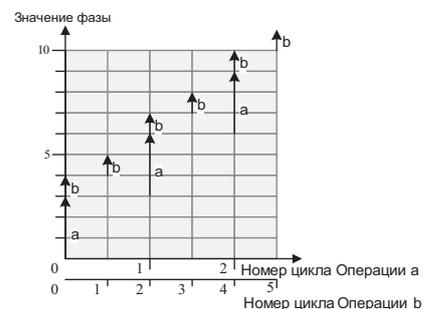
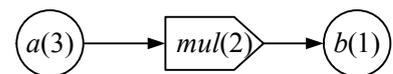


Рис. 9. Введение понятия частоты операции

Еще один пример выполнения операций с разной частотой в конвейере при использовании функции *put* (см. рис. 7) представлен на рис. 10.

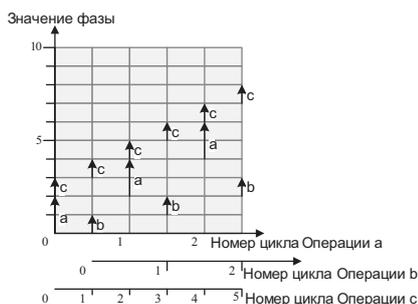


Рис. 10. Выполнение операций с разной частотой в конвейере с функцией *pit*

В физическом смысле частота определяется как количество колебаний (периодов) в единицу времени. В данном случае речь идет о том – сколько раз выполнится одна операция, пока другая выполнится один раз и частота является безразмерной величиной, т.к. номер цикла является безразмерной величиной. Однако, если ввести понятие времени выполнения цикла, то количество колебаний будет измеряться в единицу времени. Поэтому будем называть – *кратность* выполнения операции, если по оси *x* отложена нумерация циклов и *частота* выполнения операции, если по оси *x* отложено время. В том случае, когда не важно, что отложено по оси *x* будем называть частота, как более естественное понятие. Для определенности будем кратность некоторой операции в конвейере полагать равной 1, а остальные кратности вычислять относительно нее.

Свойство 3. Интервал d_i^k конвейера, содержащего только операции и спусковые функции типа *mul*, при изменении *k* от 0 до ∞ , в общем случае, ведет себя как периодическая функция.



Рис. 11. Графики интервалов операций

Продemonстрируем данное свойство на примере. Так на рис. 9 приведен пример конвейера и его

временной диаграммы. Графики интервалов операций *a* и *b* представлены на рис. 11. Из графиков видно, что интервал операции *a* постоянный и равен 3, а интервал операции *b* является периодической функцией.

Приведем еще один более сложный пример. На рис. 12 представлен конвейер и его временная диаграмма. Пунктирной ломаной прямой показан график изменения фазы конвейера, а на Рис. 13 представлены графики интервалов операций данного конвейера. Период колебания интервала операции *c* обозначен отрезками АВ – первый период и ВС – второй период.

Анализируя рассмотренные диаграммы, приходим к выводу, что можно говорить о частоте выполнения операции, о периоде колебания интервала операции (частоте колебания интервала операции) и

об амплитуде колебания интервала операции. Введем обозначения для данных величин в предположении, что *i* определяет номер операции конвейера

- обозначим частоту (кратность) колебания операции *i* как ω_i ;
- обозначим частоту колебания интервала операции *i* как Ω_i ;
- обозначим амплитуду колебания интервала операции *i* как D_i .

В качестве амплитуды колебания интервала удобно рассматривать сумму приращений интервала за период. Например, в соответствии с диаграммой на рис. 13 $D_c = 10$.

Если функция является периодической, то можно говорить о *периоде колебаний*. В данном случае период измеряется не в единицах времени, а в количестве циклов. Каждую операцию на рис. 13 следует рассматривать в масштабе ее нумерации циклов, в этом случае пе-

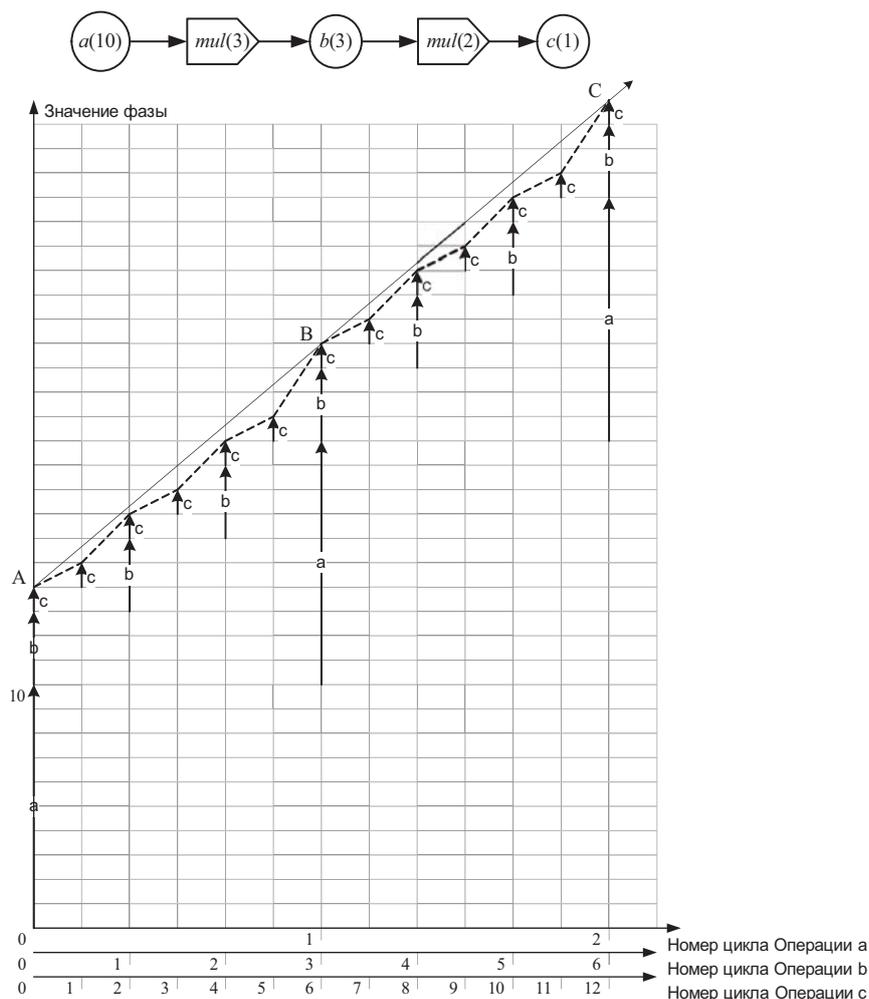


Рис. 12. Пример конвейера и его временной диаграммы

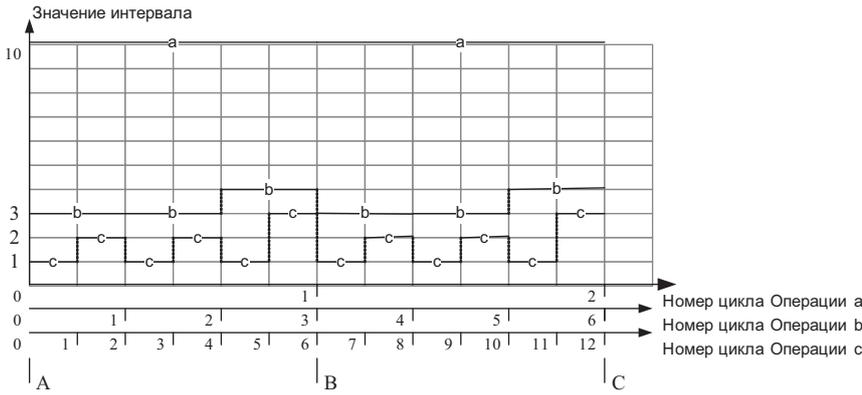


Рис. 13. Временная диаграмма интервалов конвейера

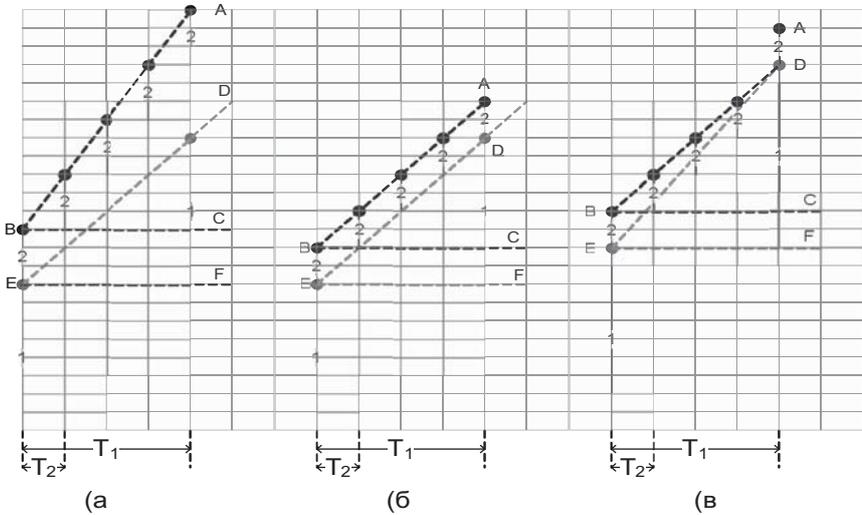


Рис. 14. Варианты изменения фаз двух операций

риод колебаний операции a равен 1, операции b равен 3, а операции c равен 6. Так как конвейер завершается операцией c , то период колебаний конвейера равен 6.

Проводя аналогичные рассуждения относительно спусковой функции $div(q)$ можно прийти к выводу, что она приводит к понижению кратности выполнения операции в q раз. Так на рис. 5 видно, что если положить кратность операции a равной 2, то кратность операции b будет равна 1. В свою очередь функция put в 2 раза повышает кратность, а функция get в 2 раза понижает.

Опишем алгоритм вычисления кратности i -й операции конвейера, на основе отношений между вершинами конвейера.

Если $1 \leq i \leq m$, то $\omega_i = 1$, где m – количество начальных вершин конвейера.

Для $i > m$
 если $a_j \rightarrow mul(q) \rightarrow a_i$, то $\omega_i = q\omega_j$,
 если $a_j \rightarrow div(q) \rightarrow a_i$, то $\omega_i = \omega_j/q$,
 если $a_j \rightarrow put \rightarrow a_i$, то $\omega_i = 2 \cdot \omega_j$,
 если $a_j \rightarrow get \rightarrow a_i$, то $\omega_i = \omega_j/2$,
 если $a_j \rightarrow and \rightarrow a_i$, то $\omega_i = \omega_j$,
 если $a_j \rightarrow a_i$, то $\omega_i = \omega_j$.

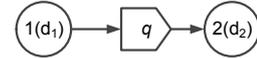
Поскольку q является положительным целым числом и при вычислении частоты функции div осуществляется деление на q , то кратность в общем случае является рациональным числом, т.е. представимым в виде дроби p/q , где p и q целые положительные числа больше нуля. Кратность выполнения операции a будем обозначать как ω_a .

Свойство 4. Пусть для некоторых операций a_i и a_j существует отношение $a_j \rightarrow mul(q) \rightarrow a_i$, если ω_i – частота, а d_i – время выполнения операции i , соответственно ω_j , d_j – частота и время выполнения опера-

ции j , то условием возникновения колебания интервала операции i является следующее отношение

$$d_j > q \cdot d_i, \text{ при } q > 1.$$

Определим условие, при котором возникает колебание интервала конвейера. Рассмотрим пример конвейера



где $q > 1$. Положим для определенности q равным 4, тогда изменения фаз двух операций могут происходить следующими вариантами, представленными на рис. 14.

В случае вариантов (а) и (б) колебания не возникают, а в случае (в) возникают, т.к. нарушается линейность изменения фазы операции 2. Это определяется отношением «скоростей» увеличения фаз операций, которые, в свою очередь, определяются величиной углов $\alpha = \angle ABC$ (для операции b) и $\beta = \angle DEF$ (для операции a). Варианты а) и б) не приводят к возникновению колебаний, т.к. угол α больше (вариант а) либо равен (вариант б) углу β . В случае варианта в) возникают колебания. Следовательно, условием возникновения колебаний является отношение

$$\alpha < \beta \text{ или } tg\alpha < tg\beta, \text{ при } \omega_2 > \omega_1.$$

Пусть $T = 1/\omega$ период колебания, как величина обратная частоте. В этом случае

$$tg\alpha = d_2 / T_2 = d_2 \cdot \omega_2,$$

соответственно

$$tg\beta = d_1 / T_1 = d_1 \cdot \omega_1$$

и получаем условие возникновения колебаний в виде отношения

$$d_1 \cdot \omega_1 > d_2 \cdot \omega_2, \text{ при } \omega_2 > \omega_1.$$

Учитывая, что $\omega_2 = q \cdot \omega_1$, окончательно получаем

$$d_1 > q \cdot d_2, \text{ при } q > 1.$$

Свойство 5. Пусть a_i и a_j две операции конвейера такие, что $a_j \rightarrow mul \rightarrow a_i$ или $a_j \rightarrow div \rightarrow a_i$. Пусть Ω_j – частота колебаний интервала операции a_j и ω_i – частота операции a_i . Соответственно определим периоды $T_j = 1/\Omega_j$ и $T_i = 1/\omega_i$,

где T_j, T_i – рациональные числа. Можно показать, что период колебаний интервала операции a_i , если выполняются условия колебания, будет равен

$$T = \text{нокр}(T_j, T_i)$$

где $\text{нокр}(r_1, r_2)$ – функция, вычисляющая наименьшее общее кратное рациональных чисел r_1 и r_2 .

В теории чисел функция нок – наименьшее общее кратное двух чисел определена для целых чисел. Так как у нас периоды являются рациональными числами, то определим ее для рациональных чисел как функцию $\text{нокр}(n/m, p/q)$, где n, m, p, q целые числа. В этом случае $N = \text{нокр}(n/m, p/q)$ может быть рациональным числом и является минимальным числом, на которое числа n/m и p/q делятся без остатка. Иначе $N = k * n/m$ и $N = l * p/q$, где k и l – целые числа. Данную функцию можно выразить через функцию для целых чисел, следующим образом

$$\text{нокр}(n/m, p/q) = \text{нок}(nq, pm)/qm.$$

Подставив в формулу выражения периодов через частоты, получим формулу для частоты колебаний интервала операции a_i

$$\Omega_i = \frac{\Omega_j \omega_i}{\text{нокр}(\Omega_j, \omega_i)}$$

При выполнении условия возникновения колебаний операции a_i .

Определение. Назовем конвейерный процесс после некоторого цикла k^s стационарным, если для любого $k \geq k^s$ интервал конвейера d_i^k является константой или периодической функцией. В противном случае процесс будем называть переходным.

Переходной процесс порождает, например, спусковая функция *and*. На рис. 3 показан пример диаграммы, в которой интервал конвейера сначала равен 1 (для $k = 1$), а потом 2 (для $k > 1$). Очевидно, что количество изменений величины интервала не превосходит количества операций конвейера, а следовательно конечно.

Свойство 6. Конвейерный процесс, в общем случае, сначала явля-

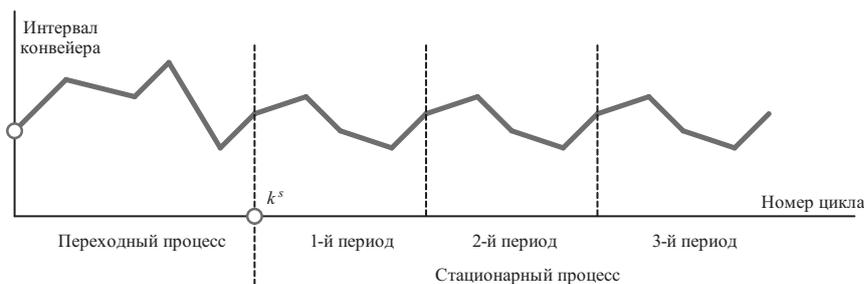


Рис. 15. Общий вид графика изменения интервала конвейерного процесса

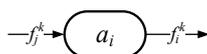
ется переходным процессом, а потом, начиная с некоторого номера цикла k^s переходит в стационарный. Стационарный процесс, в общем случае, представляет собой колебательный процесс, т.е. описывается периодической функцией (см. рис. 15).

Чтобы доказать данное свойство необходимо провести доказательство методом математической индукции для каждого типа операции. Нужно показать, что у всех операций на выходе интервал либо константа, либо периодическая функция. Опишем общую схему доказательства в три этапа.

1. Начальные операции конвейера – это либо простые операции, либо линейные конвейеры. Для них выше было показано, что фаза изменяется по линейному закону и интервал является константой.

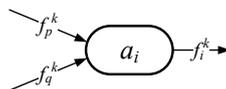
2. Рассмотрим два случая – унарной и бинарной операции:

а. Предположим, что у некоторой операции a_i интервал d_i^k предшествующей операции a_j



является константой или периодической функцией.

б. В случае бинарной операции вида



Необходимо рассматривать комбинации типов интервалов на выходе (3 варианта).

3. В этом случае интервал операции a_i будет являться константой или периодической функцией.

Если рассмотреть каждый вариант, то можно убедиться, что при любой комбинации операций и спусковых функций на выходе ин-

тервал будет либо константой, либо периодической функцией.

В зависимости от наличия или отсутствия переходного процесса и колебаний в стационарном режиме конвейеры разбиваются на следующие классы:

1. Конвейер с наличием переходного процесса и стационарных колебаний – класс 11.

2. Конвейер с наличием переходного процесса и отсутствием стационарных колебаний – класс 10.

3. Конвейер с отсутствием переходного процесса и наличием стационарных колебаний – класс 01.

4. Конвейер с отсутствием переходного процесса и отсутствием стационарных колебаний – класс 00.

Утверждение. Любой конвейер может быть преобразован в конвейер класса 00, у которого нет переходного процесса, и в стационарном процессе отсутствуют колебания. Это достигается, как правило, за счет ухудшения временных характеристик конвейера. Интервал такого конвейера есть величина постоянная.

Заключение

Модель рекурсивного конвейерного процесса как формальная система позволяет описывать более широкое множество процессов, в сравнении с параллельно-последовательными схемами и диаграммами Ганта. Рассмотренные свойства рекурсивных конвейерных процессов позволяют строить эффективные алгоритмы вычислений характеристик процесса [11, 13, 14].

Литература

1. Сачко Н.С. Организация и оперативное управление машиностроительным производством. Мн.: ООО «Новое знание», 2005. – 636 с.

2. Новицкий Н.И. Организация и планирование производства. Практикум. Мн.: ООО «Новое знание», 2004. – 256 с.

3. Воеводин В.В. Математическая модель конвейерных вычислений. М.: 1982. С. 34.

4. Штейнберг Р.Б. Автоматическое отображение программ на конвейерные и многоконвейерные архитектуры. ДКФМН. 05.13.11. М. 2012.

5. Лысаков К.Ф. Исследование методов реализации алгоритмов обработки больших потоков данных за счет конвейерного распараллеливания. ДКТН. 05.13.18. М. 2009.

6. Питеркин С.В. Быстрое производство. Современные методы управления производством. От ERP до Lean и SCM. Теория и практика применения. Любавич, 2010, 82 стр.

7. Загидуллин Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 372 с.

8. Высокочин С.В., Пителинский К.В., Смирнов Ю.Н. Принципы построения систем для расчета производственных расписаний (рус.) // САПР и графика: журнал. – М.: Компьютер Пресс, 2008. – № 9. – С. 57–59.

9. Куприянов Б. В. Моделирование конвейерных бизнес-процессов. Сборник трудов «Управление большими системами», вып. 28, 2010, 230–273.

10. Куприянов Б. В. Вычислительная модель конвейерного бизнес-процесса. Труды международной научно-практической конференции «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на Российских предприятиях. АИТА 2011. с. 649–669.

11. Куприянов Б.В. Вычисление характеристик конвейерного бизнес-процесса. Известия Российского экономического универси-

тета им. Г.В.Плеханова. №5. 2011. с. 158–190.

12. Куприянов Б.В. Применение модели конвейерных процессов рекурсивного типа для решения прикладных задач. Вестник УМО «Экономика, статистика и информатика». № 5. 2014.

13. Куприянов Б.В., Боброва А.Ю. Решение задачи календарного планирования для конвейерных бизнес-процессов. XV Научно-практическая конференция «Реинжиниринг бизнес-процессов на основе современных информационных технологий. Системы управления знаниями». Материалы конференции. Москва, 2012. 115–120.

14. Куприянов Б.В. Вычисление стоимостной характеристики конвейерного процесса определяемого рекурсивными функциями. XVII Научно-практическая конференция «Инжиниринг предприятий и управление знаниями». Материалы конференции. Москва, 2014. 168–172.

References

1. Sachko N.S. Organization and operational management of machine-building production. Mn.: ООО «Novoe znanie», 2005. – 636s.

2. Novickij N.I. Organization and planning of production. Practical work. Mn.: ООО «Novoe znanie», 2004. – 256s.

3. Voevodin V.V. Mathematical model of conveyor calculations. M.: 1982. s.34.

4. Shtejnberg R.B. Automatic display of programs to conveyor and multiconveyor architecture. DKFМN. 05.13.11. M. 2012.

5. Lysakov K.F. Research of methods of realization of algorithms of processing of big data flows due to conveyor parallelization. DКТN. 05.13.18. M. 2009.

6. Peterkin S.V. Fast production. Modern methods of management of production. From ERP to Lean and

SCM. Theory and practice of application. Lyubavich, 2010, 82 str.

7. Zagidullin R.R. Management of machine-building production by means of MES, APS, ERP systems. – Staryj Oskol: TNT, 2011. – 372 s.

8. Vysochin S.V., Pitelinskij K.V., Smirnov Yu.N. The principles of creation of systems for calculation of production schedules (Russian)// SAPR i grafika : zhurnal. – M.: Kompyuter Press, 2008. – № 9. – S. 57–59.

9. Kupriyanov B.V. Modeling of conveyor business processes. Sbornik trudov «Upravlenie bolshimi sistemami», vyp. 28, 2010, 230–273.

10. Kupriyanov B.V. Computable model of conveyor business process. Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Peredovye informacionnye tehnologii, sredstva i sistemy avtomatizacii i ih vnedrenie na Rossijskikh predpriyatijah. АИТА 2011. s. 649–669.

11. Kupriyanov B.V. Computable model of conveyor business process. Izvestiya Rossijskogo ekonomicheskogo universiteta im. G.V.Plehanova. №5. 2011. s. 158–190.

12. Kupriyanov B.V. Application of model of conveyor processes of recursive type for the solution of applied tasks. Vestnik UМО «Экономика, statistika i informatika». № 5. 2014.

13. Kupriyanov B.V., Bobrova A.Yu. The solution of a problem of scheduling for conveyor business processes. XV Nauchno-prakticheskaya konferenciya «Reinzhiniring biznes-processov na osnove sovremennyh informacionnyh tehnologij. Sistemy upravleniya znaniyami». Materialy konferencii. Moskva, 2012. 115–120.

14. Kupriyanov B.V. Calculation of the cost characteristic of the conveyor process determined by recursive functions. XVII Nauchno-prakticheskaya konferenciya «Inzhiniring predpriyatij i upravlenie znaniyami». Materialy konferencii. Moskva, 2014. 168–172.