

## МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЛЬНОГО КЛАСТЕРА С ПЕРЕМЕННЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

О. В. ЖУРАВЛЕВ

*Журнал „Большая игра: политика, бизнес и безопасность в Центральной Азии“,  
143000, Одинцово, Московская обл., Россия  
E-mail: crainov@mail.ru*

Рассматривается задача определения точных характеристик заявок, поступающих лотом (группой) в системы с радиальной структурой. Учитывается неоднородность процессных модулей и временных переходов, определяемых спецификой работы общего ресурса — транспортного робота. Задача решается путем составления системы уравнений временных событий, отражающих моменты переходов заявок из одного модуля в другой, в классе дисциплины диспетчеризации „в обратном порядке“. Разработан метод расчета характеристик кластера — времени первой задержки, времени циклов выхода заявок, числа заявок в группе лотов с учетом переналадки кластера и плановых ограничений на время пребывания лота.

**Ключевые слова:** радиальный кластер, система обслуживания, время первой задержки, времена циклов выхода заявок, время пребывания лота заявок, циклическое обслуживание, время переходов

**Введение.** Анализ общих принципов организации производственного радиального кластера позволяет выявить присущие ему особенности, в том числе:

- неоднородность нагрузки модулей;
- групповой характер поступления и обслуживания заявок;
- наличие „задержек позиционирования“ изделий и конфликтов при доступе модулей к общему ресурсу кластера — транспортному роботу (ТР);
- ограничения на время обработки заявок одного класса;
- проведение обязательных операций переналадки кластера, настраиваемого на партию лотов.

В известных исследованиях [1—3], в основном посвященных стационарному режиму функционирования, не учитываются реальные неоднородные переходы робота и задержки „позиционирования“, используются аппроксимирующие формулы. Рекомендуются применение приемлемо-сбалансированной нагрузки, но не определены условия, к которым она относится. Для оценки конфликтов доступа к общему ресурсу в полупроводниковом производстве применяется графический аппарат сетей Петри, который формализует процесс событий при однородных переходах [4, 5]. В работе [6] обсуждается схема построения имитационной модели для исследования кластерных установок с переменным временем доступа. В настоящий момент задача аналитического моделирования кластера с одним хватом с переменными временами доступа к общему ресурсу не решена. Между тем решение задач структурного и функционального проектирования сложных систем аналитическими методами позволяет использовать аналитические зависимости при решении задач анализа и синтеза [7, 8]. Представленное в настоящей статье исследование направлено на разработку точного метода расчета радиальной производственной системы с неоднородной нагрузкой и неоднородными переходами между процессными модулями. Также решается задача выбора размера и числа лотов с учетом времени переналадки кластера и ограничения на время пребывания группы заявок в системе.

**Постановка задачи и модель кластера.** В качестве модели детального анализа функционирования радиального кластера используется детерминированная модель с множеством последовательных обслуживающих модулей, в которую поступает партия лотов (групп) заявок. Переход заявки из одного модуля в другой невозможен до окончания процесса обработки предшествующей заявки и осуществляется с учетом времени перехода, отражающего в модели суммарную работу транспортного робота по переносу заявки в следующий модуль. Согласно классификации загруженности робота [3] в данной работе рассматривается так называемый случай с процессным ограничением, когда в рабочем полном цикле ТР возникают отрезки времени ожидания окончания обслуживания заявок в процессных модулях.

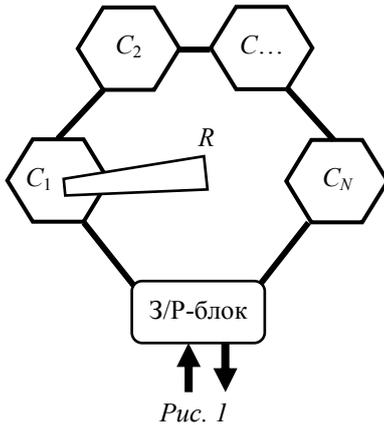


Рис. 1

Заявки одного класса составляют лот из  $M$  заявок, которые формируют партию из  $G$  лотов. Кластерная установка имеет  $N$  процессных модулей:  $C_1, \dots, C_N$  (рис. 1). ТР  $R$  имеет один хват и осуществляет цикл взаимодействия с модулем и заявкой, состоящий из следующих операций: перемещение, захват, перемещение, размещение. Дисциплина диспетчеризации (обслуживания) „в обратном порядке“ (ДО BS — backward sequence) [1—3] характерна для функционирования кластеров с одним хватом и в классической теории массового обслуживания соответствует расписанию с обратным циклическим обслуживанием. Все заявки лота имеют одинаковый технологический маршрут, предполагающий последовательное прохожде-

ние заявки от модуля  $C_1$  до модуля  $C_N$ . Заявка загружается транспортным роботом в модуль  $C_1$  из специального загрузочно-разгрузочного (З/П) блока, затем обслуживается последовательно в процессных модулях и возвращается обратно в блок. Заявка беспрепятственно доступна на входе и выходе З/П-блока, как только ТР будет готов взаимодействовать с ней.

Момент времени  $X_{k,j}$  начала перехода заявки класса  $k$  ( $k$ -заявки) в  $j$ -й модуль соответствует началу процедуры взаимодействия ТР с заявкой по данному переходу. Время обслуживания  $t_{k,j} = t_j$   $k$ -заявки в  $j$ -м модуле не зависит от индекса  $k$  и является детерминированной величиной. Момент поступления лота заявок  $A_L = A_{k,1} = 0$ . Временные параметры единичного перехода:  $m^1$  — перемещение „пустого“ ТР без заявки к назначенному модулю;  $g$  — захват заявки с „позиционированием“;  $m^2$  — перемещение „непустого“ ТР с заявкой;  $p$  — размещение с „позиционированием“;  $m$  — единичный трек „непустого“ ТР между соседними модулями. Тогда, в общем виде, время движения ТР на одном единичном переходе при ДО BS равно  $E = m^1 + g + m^2 + p$ . Все параметры перехода являются детерминированными величинами. Поэтому время перехода  $E_{k,j}$   $k$ -заявки в  $j$ -й модуль является детерминированной величиной.

**Классификация времени переходов.** Для ДО BS времена переходов между модулями могут быть разделены на три вида.

1. Время перехода  $E_{k,1}$   $k$ -заявки из загрузочного блока в модуль  $C_1$  определяется как  $E_{k,1} = m^1_{k,1} + g_{k,1} + m^2_{k,1} + p_{k,1} = 2m + g_{k,1} + m + p_{k,1}$ , где  $m^1_{k,1} = 2m$ ,  $m^2_{k,1} = m$ .
2. Время перехода  $E_{k,j}$   $k$ -заявки между смежными процессными модулями (из  $(j-1)$ -го модуля в  $j$ -й модуль), равно  $E_{k,j} = m^1_{k,j} + g_{k,j} + m^2_{k,j} + p_{k,j} = m^1_{k,j} + g_{k,j} + m + p_{k,j}$ , так как  $m^2_{k,j} = m$ , является характеристикой модели и учитывает момент старта „пустого“ ТР

к  $(j-1)$ -му модулю, в зависимости от этого момента модельное значение  $m^1_{k,j}$  может находиться в диапазоне  $[0; 2m]$ .

3. Время перехода  $E_{k,N+1} = E_{k,out}$  из последнего модуля  $C_N$  во внешний З/Р-блок определяется как  $E_{k,N+1} = m^1_{k,N+1} + g_{k,N+1} + m^2_{k,N+1} + p_{k,N+1} = m^1_{k,out} + g_{k,out} + m + p_{k,out}$ . При наличии реверсивного (против часовой стрелки) технического решения трека ТР ( $C_1 - C_N$ ) параметр  $m^1_{k,N+1}$  в модели принимает значения в диапазоне  $[0; 3m]$  при  $N > 3$ , в противном случае — в диапазоне  $[0; (N-1)m]$ .

**Метод расчета.** Существенное отличие предложенного метода расчета характеристик заявок заключается в учете неоднородных переходов, имеющих видовые различия согласно вышеуказанной классификации. Для решения задачи составляется система эволюционных уравнений [9], отражающих события, происходящие в кластере с произвольной нагрузкой при продвижении заявок:

$$\left. \begin{aligned} X_{k,1} &= \max[(A_{k,1}); (X_{k-1,2} + E_{k-1,2})] \text{ — для первого модуля;} \\ X_{k,j} &= \max[(X_{k,j-1} + t^*_{k,j-1}); (X_{k-1,j+1} + E_{k-1,j+1})] \text{ — для смежных модулей;} \\ X_{k,N+1} &= \max[(X_{k,N} + t^*_{k,N}); (X_{(k+N-1),1} + E_{(k+N-1),1})] \text{ — для выхода из модуля } C_N; \\ X_{k,out} &= (X_{k,N+1} + E_{k,out}) \text{ — для выхода заявок из модуля } C_N \text{ в З/Р-блок,} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $t^*_{k,j} = E_{k,j} + t_{k,j}$ ;  $k = \{1, 2, \dots, M\}$ ;  $j = \{1, 2, \dots, N\}$ ;  $X_{11} = 0$ .

При решении системы уравнений (1) наряду с переменной  $X_{k,j}$  определяется также переменная  $E_{k,j}$ , а расчет проводится эволюционным образом, т.е. индексы меняются не последовательно, а по мере возникновения в цикле событий и связанных с ними переходов. Для учета неоднородных переходов необходимо сравнение на максимум двух моментов времени, соответствующих событиям  $(X_{k,j-1} + t^*_{k,j-1})$  и  $(X_{k+1,j+1} + E_{k+1,j+1})$ . Неравенство  $(X_{k,j-1} + t^*_{k,j-1}) > (X_{k+1,j+1} + E_{k+1,j+1})$  соответствует ситуации, когда стартует „пустой“ ТР в момент  $(X_{k+1,j+1} + E_{k+1,j+1})$ , а обслуживание  $k$ -заявки в  $(j-1)$ -м модуле еще не закончилось. Если  $(X_{k,j-1} + t^*_{k,j-1}) \leq (X_{k+1,j+1} + E_{k+1,j+1})$ , то  $(j-1)$ -й модуль уже завершил обслуживание  $k$ -заявки.

В практическом плане результатом решения системы уравнений является набор значений  $X_{k,j}$ , отражающий временную карту стартов ТР на основе циклического обслуживания ДО BS. Однако для исследования объекта, получения данных о характере его функционирования и использования результатов в задачах синтеза необходимо получить решение в аналитическом виде. С этой целью вводятся бинарные переменные  $Z_{k,j}, Y_{k,j}$ , которые характеризуют результат сравнения двух событий. Математически, если  $(X_{k,j-1} + t^*_{k,j-1}) > (X_{k+1,j+1} + E_{k+1,j+1})$ , то переменная  $Z_{k,j} = 1$ , а переменная  $Y_{k,j} = (1 - Z_{k,j}) = 0$ , иначе —  $Z_{k,j} = 0$ , а  $Y_{k,j} = (1 - Z_{k,j}) = 1$ . Переменные  $Z_{k,j}$  и  $Y_{k,j}$  характеризуют ветвление процесса расчета в момент  $X_{k,j}$ :  $X_{k,j} = Z_{k,j}(X_{k,j-1} + t^*_{k,j-1}) + Y_{k,j}(X_{k+1,j+1} + E_{k+1,j+1})$ .

Расчет характеристик в системе с произвольной нагрузкой и произвольным числом модулей состоит из трех этапов.

*1-й этап.* Начальный период (IP) продолжается до момента времени, когда первая заявка, последовательное обслуживание которой завершено, поступает во внешний блок. Особой

спецификой обладают переходы  $E_{k,N+1}$  между „крайними“ модулями, замыкающие полный цикл переходов ТР. На основании системы уравнений (1), следуя эволюционной логике развития процесса, получаем рекуррентное выражение времени задержки первой заявки в  $N$  модулях системы:

$$X_{1,N+1} = Z_{1,N+1}(X_{1,N} + t_{1,N}^*) + Y_{1,N+1} \left[ \sum_{\substack{i=1, \\ j=N+1-i}}^N A(E_{i,j} + Z_{i,j}(X_{i,j-1} + t_{i,j-1}^*)) \right] + Y_{1,N+1} B(E_{N-1,1} + X_{N-1,1}); \quad (2)$$

$$A_{i,j} = \prod_{\substack{w=i+1, \\ v=N+1-w}}^N Y_{wv}; \quad B = \prod_{\substack{w=1, \\ v=N+1-w}}^N Y_{wv}; \quad i < N.$$

Значения переменных в выражении (2), имеющих нулевой индекс, равны нулю. Время задержки первой заявки в системе  $X_{1,out} = X_{1,N+1} + E_{1,out}$ .

*2-й этап.* В стационарном периоде (SP) ТР характеризуется наибольшим числом переходов и охватывает своими действиями все модули и внешний блок. Первый полный цикл ТР начинается в момент времени  $X_{1,N+1} + E_{1,out}$  и заканчивается в момент  $X_{2,N+1} + E_{2,out}$ . Этот период содержит  $(M - N)$  стационарных циклов ТР, которые заканчиваются в момент  $X_{M-N+1,N+1} + E_{M-N+1,out}$ .

Время задержки  $k$ -заявки в  $N$  модулях определяется рекуррентным выражением

$$X_{k,N+1} = Z_{k,N+1}(X_{k,N} + t_{k,N}^*) + Y_{k,N+1} \left[ \sum_{\substack{i=k, \\ j=N+k-i}}^N A(E_{i,j} + Z_{i,j}(X_{i,j-1} + t_{i,j-1}^*)) + B(E_{k-1,N+1} + X_{k-1,N+1}) \right]; \quad (3)$$

$$A_{i,j} = \prod_{\substack{w=i+1, \\ v=N+k-w}}^{N+k-1} Y_{wv}; \quad B = \prod_{\substack{w=k, \\ v=N+k-w}}^{N+k-1} Y_{wv}; \quad k = 2, \dots, (M - N + 1).$$

Система с обратным порядком обслуживания ДО BS обладает свойством повторяемости процессов в стационарном режиме и после выхода второй заявки из системы цикл заявок ( $T_{WSP}$ ) устанавливается постоянным. Можно использовать это свойство для определения длительности стационарного периода по сокращенной схеме:

$$T_{SP} = (M - N) (X_{2,out} - X_{1,out}) = (M - N) (X_{k,out} - X_{k-1,out}), \quad k = 2, \dots, (M - N + 1).$$

*3-й этап.* В финишном периоде (FP) число переходов в рабочем цикле ТР постепенно снижается. Период начинается с момента  $(X_{M-N+1,N+1} + E_{M-N+1,out})$ , когда заявка под номером  $(M - N + 1)$  покидает систему, и длится до момента  $(X_{M,N+1} + E_{M,out})$ , когда последняя  $M$ -заявка, совершив переход  $E_{M,out}$ , покидает систему. Первый неполный цикл финишного периода повторяет „контуры“ соответствующих переходов в стационарном режиме за исключением трека ТР  $E_{k,1}$  между загрузочной частью внешнего блока и процессным модулем  $C_1$ , а их соответствующие значения кратны величине  $T_{WSP}$ .

Время выхода  $k$ -заявки  $X_{k,out}$  из системы:

$$X_{k,N+1} = Z_{k,N+1} (X_{k,N} + t^*_{k,N}) + Y_{k,N+1} \left[ \sum_{\substack{i=k, \\ j=N+k-i}}^M A_{i,j} (E_{i,j} + Z_{i,j} (X_{i,(j-1)} + t_{i,(j-1)})) \right] + Y_{k,N+1} B (X_{k-1,N+1} + E_{k-1,N+1}); \tag{4}$$

$$A_{i,j} = \prod_{\substack{w=i+1, \\ v=N+k-w}}^M Y_{wv}; \quad B = \prod_{\substack{w=k, \\ v=N+k-w}}^M Y_{wv}; \quad k = (M - N + 2), \dots, M.$$

Время задержки  $k$ -заявки в финишном периоде  $X_{k,out} = X_{k,N+1} + E_{k,out}$ .

Время цикла выхода из кластера смежных заявок в финишном периоде  $T_{WFP}(j)$  равно разности величин  $X_{k,out}$  и  $X_{k+1,out}$ , а длительность периода равна сумме циклов заявок:

$$T_{FP} = \sum_{j=2}^{N-1} T_{WFP}(j). \text{ Таким образом, полное время обработки одного лота}$$

$$T_L = T_{IP} + (M - N)T_{WSP} + T_{FP} = X_{1,N+1} + E_{1,N+1} + (M - N)T_{WSP} + T_{FP}.$$

Анализ системы с произвольной нагрузкой и неоднородными переходами предполагает охват всевозможных событий и циклов, происходящих в системе на протяжении всех трех периодов обслуживания лота заявок. Однако существует класс систем с так называемой приемлемо-сбалансированной нагрузкой, используемой в полупроводниковом производстве [1—3]. Для событий, описываемых системой уравнений (1), это условие соответствует неравенству:  $(X_{(N+k-1),1} + E_{(N+k-1),1}) < (X_{k,N} + t^*_{k,N})$  для всех заявок лота. В этом случае цикл заявок лота носит постоянный характер — от первой задержки системы до окончания обслуживания лота. Очевидно, что для определения времени пребывания лота достаточно определить задержку первой и второй заявок, что значительно упрощает схему расчета:

$$T_L = T_{IP} + (M - 1)T_{WSP} = X_{1,N+1} + E_{1,N+1} + (M - 1)T_{WSP}.$$

**Расчет времени цикла обработки партии лотов.** Переналадка кластера для группы лотов одного класса проводится перед выполнением запуска группы. Поэтому полное время пребывания группы лотов  $G$ , непрерывно поступающих в кластер, с учетом времени переналадки  $U_S$  определяется по формуле

$$T_G = U_S + T_{IP} + (MG - N)T_{WSP} + T_{WFP} = U_S + X_{1,N+1} + E_{1,N+1} + (MG - N)T_{WSP} + T_{WFP}.$$

Тогда для решения задачи выбора числа заявок одного класса при ограничении по времени пребывания партии лотов ( $U_G^* \geq T_G$ ) должно выполняться условие

$$MG \leq (U_G^* - U_S - X_{1,N+1} - E_{1,out} + NT_{WSP} - T_{WFP}) / T_{WSP}.$$

В случае применения приемлемо-сбалансированной нагрузки значение  $MG$  удовлетворяет следующему условию:

$$MG \leq (U_G^* - U_S - X_{1,N+1} + E_{1,N+1} + T_{WSP}) / T_{WSP}.$$

**Пример.** Параметры модели:  $N = 3; M = 5$ ; время обслуживания в модулях:  $t_1 = 20$  с;  $t_2 = 10$  с;  $t_3 = 15$  с. Пусть параметры всех переходов одинаковые:  $m = 1; g_{k,j} = g = 1; m^2_{k,j} = m; p_{k,j} = p = 1$ , за исключением параметра  $g_{k,1} = 3$  с ( $k=1, \dots, 3$ ).

Диаграмма функционирования кластера с ДО BS, отображающая неоднородные переходы, представлена на рис. 2.

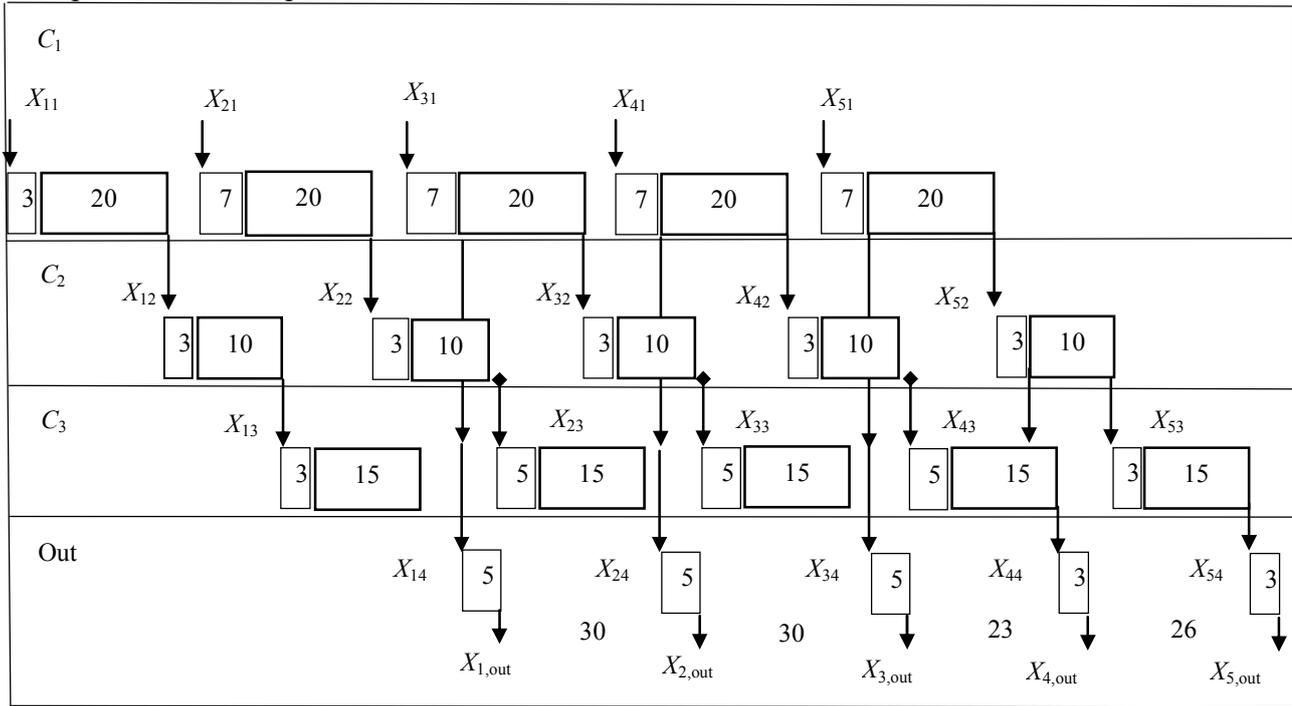


Рис. 2

Ограничения по времени пребывания группы лотов  $U^*_G = 500$  с. Время переналадки кластера  $U_S = 60$  с. Для упрощения записи опустим обозначение единиц времени.

Зададим начальные данные первых нециклических переходов:

$$(X_{11} = 0; E_{11} = 3) \quad (Z_{12} = 1; E_{12} = 3; X_{12} = 23) \quad (E_{21} = 7; Z_{21} = 0; X_{21} = 26).$$

В начальном периоде существует единственный цикл  $X_{13} - X_{22} - X_{31} - X_{14}$ :

$$X_{1,3} = Z_{13}(X_{12} + t^*_{12}) + Y_{21}Y_{13}[(X_{21} + E_{21})] + Y_{13}[E_{21} + Z_{21}(X_{20} + t^*_{20})].$$

Согласно системе уравнений (1),  $(Z_{13} = 1; m^1_{13} = 0; E_{13} = 3)$ . Тогда  $X_{1,3} = X_{12} + t^*_{12} = 36$ .

Также согласно (1),

$$(Z_{22} = 1; m^1_{22} = 0; E_{22} = 3; X_{22} = 53) \text{ и } (Z_{31} = 0; m^1_{31} = 2m = 2; E_{31} = 7; X_{31} = 56).$$

Тогда

$$X_{1,4} + E_{1out} = Z_{14}(X_{13} + t^*_{13}) + Y_{14}Y_{31}Y_{22}Y_{13}[(X_{21} + E_{21})] + Y_{14}Y_{22}Y_{31}[E_{13} + Z_{13}(X_{12} + t^*_{12})] + Y_{14}Y_{31}[E_{22} + Z_{22}(X_{21} + t^*_{21})] + Y_{14}[E_{31} + Z_{31}(X_{30} + t^*_{30})] + E_{1out}.$$

Имеем  $(Z_{14} = 0; m^1_{14} = 2; E_{14} = E_{1out} = 5)$   $(Z_{13} = 1, Z_{22} = 1, Z_{31} = 0)$ . Тогда время первой задержки согласно (2) равно

$$X_{1out} = X_{1,4} + E_{14} = (X_{21} + t^*_{21}) + E_{22} + E_{31} + E_{1out} = 68.$$

В стационарном периоде существует цикл переходов  $X_{1,4} - X_{23} - X_{32} - X_{41} - X_{2,4}$ . Согласно (1),

$$(Z_{23} = 0; m^1_{23} = 2; E_{23} = 5; X_{23} = 68) \quad (Z_{32} = 1; m^1_{32} = 0; E_{32} = 3; X_{32} = 83) \\ (Z_{41} = 0; m^1_{41} = 2; E_{41} = 7; X_{41} = 86) \quad (Z_{24} = 0; m^1_{24} = 2; E_{24} = E_{2out} = 5).$$

Время второй задержки согласно формуле (3) равно

$$X_{2,4} + E_{2out} = Z_{24}(X_{23} + t_{23} + E_{13}) + Y_{24}Y_{41}Y_{32}Y_{23}[(X_{14} + E_{14})] + \\ + Y_{24}Y_{41}Y_{32}[E_{23} + Z_{23}(X_{22} + t_{22} + E_{22})] + Y_{24}Y_{41}[E_{32} + Z_{32}(X_{31} + t_{31} + E_{31})] + \\ + Y_{24}[E_{41} + Z_{31}(X_{30} + t_{30} + E_{30})] = X_{31} + t_{31} + E_{31} + E_{32} + E_{41} + E_{2out} = 98.$$

Время цикла для 2-й заявки:

$$T_{WSP} = X_{2out} - X_{1out} = (X_{31} + t_{31} + E_{31} + E_{32} + E_{41} + E_{1out}) - (X_{21} + t_{21} + E_{21}) + E_{22} + E_{31} + E_{2out} = \\ = (X_{31} + t_{31} + E_{31}) - (X_{21} + t_{21} + E_{21}) = X_{31} - X_{21} = 30.$$

Время цикла для 3-й заявки  $X_{3out} - X_{2out} = 30$ .

В финишном периоде — цикл  $X_{34} - X_{43} - X_{52} - X_{44}$ . Согласно (4),

$$X_{4out} = X_{4,4} = Z_{44}(X_{43} + t_{43}^*) + Y_{44}Y_{52}Y_{43}[(X_{34} + E_{34})] + Y_{44}Y_{52}[E_{43} + Z_{43}(X_{42} + t_{42}^*)] + \\ + Y_{44}[E_{52} + Z_{52}(X_{51} + t_{51}^*)] + E_{4out}.$$

Так как согласно (1),

$$(Z_{44} = 1, m_{44}^1 = 0; E_{44} = E_{4out} = 3) \quad (Z_{43} = 0; m_{43}^1 = 2; E_{43} = 5; X_{43} = 128),$$

то  $X_{4out} = (X_{43} + t_{43}^*) + E_{4out} = 151$ .

Последний цикл лота заявок в кластере  $X_{4,4} - X_{53} - X_{54}$ . Согласно (1),

$$(Z_{53} = 1; m_{53}^1 = 0; E_{53} = 3; E_{54} = E_{5out} = 3; Z_{54} = 1).$$

Согласно выражению (4):

$$X_{54} + E_{5out} = Z_{54}(X_{53} + t_{53}^*) + Y_{54}[E_{53} + Z_{53}(X_{53} + t_{53}^*)] + Y_{54}Y_{53}[X_{44} + E_{44}] + E_{5out} = \\ = Z_{54}(X_{53} + t_{53}^*) = X_{53} + t_{53}^* + E_{5out} = 177.$$

Тогда время цикла для 5-й заявки

$$(X_{54} + E_{5out}) - (X_{44} + E_{4out}) = X_{53} + t_{53}^* + E_{5out} - (X_{43} + t_{43}^*) + E_{4out} = 26.$$

Сумма циклов заявок в финишном периоде  $T_{WFP} = (X_{4out} - X_{3out}) + (X_{5out} - X_{4out}) = \\ = 23 + 26 = 49$ . Время цикла лота  $T_L = X_{14} + E_{14} + (M - N)T_{WSP} + T_{WFP} = 177$ .

Решим далее задачу выбора числа заявок, удовлетворяющих допустимому времени пребывания  $U_G^*$  в кластере с учетом времени переналадки ( $U_S$ ):

$$MG \leq (U_G^* - U_S - X_{1, N+1} + NT_{WSP} - T_{WFP}) / T_{WSP} = 13,76.$$

Очевидно, что при заданном размере лота  $M = 5$  число партий  $G = 2$  будет удовлетворять ограничению по времени пребывания.

**Заключение.** Рассмотренный метод оценивания событий для расчета характеристик обслуживания системы с радиальной структурой с одним хватом, неоднородной нагрузкой и переменными переходами заявок позволяет решить задачу выбора допустимого числа изделий лота с учетом времени переналадки кластера и ограничений на время пребывания лотов. Применение других видов транспортных роботов, оптимизация расписаний, а также функционально-структурное проектирование — предмет дальнейших исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee T. E., Lee H. Y., Shin Y. H. Workload balancing and scheduling of a single-armed cluster tool // Proc. of the 5th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conf. 2004.
2. Ahn Y., Morrison J. R. Analysis of circular cluster tools: transient behavior and semiconductor equipment models // Proc. of the 21th Annual. IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conf. Italy, 2010. P. 121—131.
3. Vencatesh S., Davenport R., Foxhoven P. A steady-state throughput analysis of cluster tools: dual-blade versus single-blade robots // IEEE Transact. on Semiconductor Manufacturing. 1994. Vol. 7, N 3. P. 369—373.

4. Wu N., Zhou M. Modeling, analysis and control of dual-arm cluster tools with residency time constraint and activity time variation based on Petri nets // IEEE Transact. on Automation Science and Engineering. 2012. Vol. 9, N 2. P. 446—454.
5. Wu N., Chu F., Chu C., Zhou M. Petri net-based scheduling of single-arm cluster tools with reentrant atomic layer deposition processes // IEEE Transact. on Automation Science And Engineering. 2011. Vol. 8, N 1. P. 42—55.
6. Куликов И. Управление потоками полуфабрикатов в многокластерной технологической установке с переменным значением времени доступа к процессным модулям // Science XXI Century: Proc of the Intern. Sci. Conf. Praga. 2015.
7. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
8. Алиев Т. И. Проектирование систем с приоритетами // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 4. С. 30—35.
9. Friedman H. Reduction methods for tandem queuing systems // Operation Research. 1965. Vol. 13, N 1. P. 121—131.

**Сведения об авторе**

**Олег Владимирович Журавлев**

— канд. техн. наук; журнал „Большая игра: политика, бизнес и безопасность в Центральной Азии“, заместитель главного редактора;  
E-mail: crainov@mail.ru

Поступила в редакцию  
28.09.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Журавлев О. В. Метод расчета характеристик радиального кластера с переменными переходами // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 3. С. 219—226.

**METHOD FOR CALCULATING CHARACTERISTICS  
OF RADIAL CLUSTER WITH VARIABLE TRANSITIONS**

**O. V. Zhuravlev**

*The magazine "The Big Game: Politics, Business and Security in Central Asia",  
143000, Odintsovo, Moscow region, Russia  
E-mail: crainov@mail.ru*

The problem of determining the exact characteristics of demands entering as a lot (group) into system with radial structure is investigated. The consideration accounts for the inhomogeneity of processing modules and temporal transitions determined by the specifics of the common resource (transport robot) activity. The problem is solved by drawing up a system of time event equations that reflect the transition times of demands from one module to another, in the class of backward sequence dispatching discipline. A method for calculating the characteristics of the cluster is developed. The characteristics include the time of the first delay, the cycle of demands, the number of demands in the lot group with the account for reconfiguration of the cluster and the planned restrictions on the time of the lot.

**Keywords:** radial cluster, service system, first delay time, application cycle time, lot cycle time, cyclic maintenance, transition time

**Data on author**

**Oleg V. Zhuravlev** — PhD; The Magazine “The Big Game: Politics, Business and Security in Central Asia”, Deputy Chief Editor; E-mail: crainov@mail.ru

**For citation:** Zhuravlev O. V. Method for calculating characteristics of radial cluster with variable transitions. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 3. P. 219—226 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-3-219-226