

УДК 681.5.09

В.Я. Копп, профессор, д-р техн. наук,

Л.Е. Карташов, канд. техн. наук, ст. преподаватель,

А.И. Балакин, ст. преподаватель

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: ps@sevgtu14.sebastopol.ua

МОДЕЛЬ ГИБКОЙ СИНХРОННОЙ ЛИНИИ С РЕФЛЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

Рассмотрены структуры автоматизированных линий с обратными связями, предложены аналитическая и имитационная модели синхронных автоматизированных линий с обратными связями.

В условиях рыночной экономики использование гибких производственных систем (ГПС) позволяет существенно повысить эффективность предприятия. Одними из наиболее распространенных ГПС являются гибкие автоматизированные линии (ГАЛ), которые характеризуются сложной структурой и выполняют большое количество операций в условиях недетерминированной среды.

Важным параметром, характеризующим функционирование таких линий, наряду с их производительностью и надежностью, является время обслуживания партии продукции, включая начальный период заполнения и конечный – опорожнения линии. В условиях частой смены номенклатуры изделий эти два периода сравнимы по длительности, а в некоторых случаях могут превышать время работы линии в установившемся режиме.

При моделировании таких ГАЛ необходимо учитывать стохастический характер функционирования гибких производственных модулей (ГПМ), из которых они состоят. Стохастичность вызвана такими вероятностными характеристиками, как надежность ГПМ и времена обслуживания ими единицы продукции. Анализ литературы показывает, что модели, позволяющие определять время обслуживания партии в целом с учетом стохастического характера функционирования ГПМ, практически отсутствуют.

Следует отметить, что синхронные ГАЛ и в настоящее время широко используются в машино и приборостроении. Под синхронной понимают такую линию, в которой ГПМ, входящие в ее состав, непосредственно соединены друг с другом без использования межоперационных накопителей. Существуют три стратегии управления функционированием синхронными линиями: построение ГАЛ с жестким циклом передачи продукции от ячейки к ячейке, с рефлексорным управлением и со свободным ритмом.

В синхронных ГАЛ с жестким циклом передача продукции от ячейки к ячейке производится через строго определенный отрезок времени, гарантированно обеспечивающий выполнение операций всеми ГПМ. Это наиболее простой способ управления, имеющий следующий недостаток: требуется гарантированный запас времени для завершения выполнения всех операций, что снижает производительность.

В синхронных ГАЛ с рефлексорным управлением ГПМ оснащены датчиками выполнения операций, и передача продукции производится в момент, когда обслуживание на всех ГПМ закончено. Гарантированный запас времени для завершения выполнения всех операций в этом случае не нужен, поэтому производительность линии выше.

В синхронных ГАЛ со свободным ритмом передача каждой единицы продукции от ГПМ к ГПМ производится при наличии возможности (свободного следующего ГПМ) и при условии окончания данной операции. Эта особенность позволяет повысить производительность линии, т.к. уменьшается влияние блокировок ГПМ друг друга.

Считается, что построение моделей функционирования синхронных ГАЛ первых двух типов не вызывают трудностей. Однако, когда времена обслуживания продукции на ГПМ являются случайными величинами, имеющими распределения общего вида, точно определить производительность линии проблематично. Кроме того, использование в ГАЛ конвейеров ограничивает варианты управления первым или вторым типом. Исходя из этого, задача разработки моделей функционирования синхронных ГАЛ является актуальной.

Целью статьи является построение аналитической и имитационной моделей синхронной автоматизированной линии с обратными связями, и сравнение результатов моделирования.

Поставим следующую задачу: построить марковскую модель синхронной автоматизированной линии (САЛ), структурная схема которой изображена на рисунке 1.

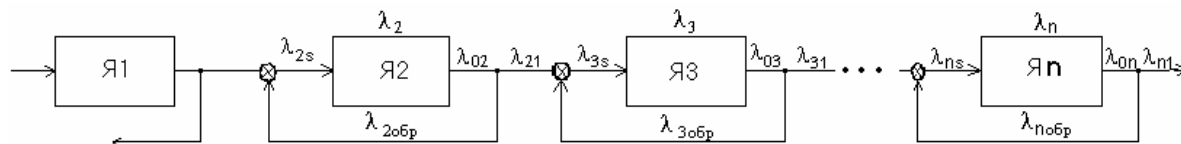


Рисунок 1 – Структурная схема синхронной автоматизированной линии с обратными связями

Рассмотрим n -компонентную САЛ с рефлекторным управлением и обратными связями. САЛ функционирует следующим образом. Происходит последовательная обработка изделия на технологических ячейках (ТЯ) сначала ТЯ₁, затем ТЯ₂, и т.д. до ТЯ _{n} . Каждая ТЯ охвачена линией обратной связи. ТЯ могут находиться в двух состояниях: рабочем (происходит обработка изделия) и нерабочем (отказ ТЯ или отключение из-за блокировки).

Для управления САЛ используется рефлекторное управление. При этом предполагается, что все ТЯ САЛ датчики, информирующие систему управления об окончании обработки изделия на ТЯ. При обнаружении брака на выходе ТЯ изделие отправляется на повторную обработку по линии обратной связи. В момент времени, когда обработка закончена на всех ТЯ, происходит передача изделий с предыдущих ТЯ на последующие. На вход САЛ изделия постоянно поступают, с выхода САЛ они выпускаются после завершения очередного цикла

Необходимо при известных интенсивностях потоков восстановления, потоков отказа, временах обслуживания на каждой ТЯ, а также вероятности того, что изделие окажется годным, на выходе ТЯ определить производительность САЛ с обратными связями.

Определим интенсивности обслуживания каждой ТЯ исходя из надежностных характеристик, т.е.

$$\lambda_i = \frac{\mu_i}{t_i (\mu_i + l_i)},$$

где λ_i – интенсивность обслуживания ячейки; μ_i – интенсивность потока восстановления; l_i – интенсивность потока отказов; t_i – время обслуживания ячейки; i – номер технологической ячейки.

Для решения поставленной задачи применим итерационный подход.

На нулевой итерации будем рассматривать обычную САЛ без обратных связей. Необходимо определить интенсивности на выходе каждой ТЯ САЛ.

Для двух последовательно соединенных ТЯ математическое ожидание времени обслуживания равно:

$$M\alpha_{\Sigma 2} = M\alpha_1 + M\alpha_2 - M(\alpha_1 \wedge \alpha_2).$$

Здесь $M\alpha_1$ – математическое ожидание случайной величины α_1 (время обслуживания на ТЯ₁); $M\alpha_2$ – математическое ожидание случайной величины α_2 (время обслуживания на ТЯ₂); $M(\alpha_1 \wedge \alpha_2)$ – математическое ожидание минимума случайных величин α_1 и α_2 .

Интенсивность на выходе ТЯ₂ определяется как величина обратная $M\alpha_{\Sigma 2}$, т.е.

$$\lambda_{02} = \frac{1}{M\alpha_{\Sigma 2}}.$$

Производительность САЛ без обратных связей с рефлекторным управлением равна [1]:

$$P = \left[\sum_{i=1}^n M\alpha_i - \sum_{1 \leq l_1 < l_2 \leq n} M(\alpha_{l_1} \wedge \alpha_{l_2}) + \sum_{1 \leq l_1 < l_2 < l_3 \leq n} M(\alpha_{l_1} \wedge \alpha_{l_2} \wedge \alpha_{l_3}) - \dots + (-1)^{n-1} M(\alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \dots \wedge \alpha_n) \right]^{-1}. \quad (1)$$

Определив интенсивности λ_{0i} для каждой ТЯ по формуле (1), вычисляем интенсивности потоков изделий, идущих по обратным связям, и интенсивности разряженных потоков

$$\lambda_{i1} = \lambda_{0i} p; \quad \lambda_{iобр} = \lambda_{0i} (1 - p); \quad \lambda_{is} = \lambda_{0i-1} + \lambda_{iобр},$$

где λ_{i1} – интенсивности разряженных потоков; $\lambda_{iобр}$ – интенсивности идущие по обратным связям; λ_{is} – суммарные интенсивности на входе каждой ячейки после суперпозиции двух потоков.

На последующих итерациях рассматриваем САЛ с ОС. Для определения производительности на выходе каждой ТЯ используем следующие выражения:

$$M_{\Sigma i} = \frac{1}{\lambda_{is \ j-1}} + \frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_{is \ j-1} + \lambda_i}; \quad \lambda_{0i} = \frac{1}{M_{\Sigma i}}; \quad \lambda_{i1} = \lambda_{0i} p, \\ \lambda_{iобр} = \lambda_{0i} (1 - p); \quad \lambda_{is} = \lambda_{0i-1} + \lambda_{iобр}.$$

Значение $\lambda_{is\ j-1}$ при определении $M_{\Sigma i}$ берется с предыдущей итерации.

Организовав итерационный процесс с использованием приведенных выше формул, можно получить производительность линии.

Построим также имитационную модель синхронной ГАЛ.

Задача ставится следующим образом: построить имитационную модель функционирования синхронной ГАЛ с рефлекторным управлением, содержащую 4 ГПМ. Время обработки на всех ГПМ распределено по экспоненциальному закону. Среднее время обработки принимаем равным 4 мин. Необходимо определить производительность линии.

Для решения данной задачи была использована система имитационного моделирования GPSS World Student version 4.3.5. Текст программы, приведенный ниже, снабжен комментариями и дополнительных пояснений не требует.

```
*****
; GPSS World File - Модель синхронной линии. Еденица времени 1 мин
*****

GENERATE    , , , 1

Lab0        SPLIT      1, Lab2
            SPLIT      1, Lab3
            SPLIT      1, Lab4
Lab1        SEIZE       ASC1                ; занять ГПМ1
            ADVANCE     (Exponential(1,0,4.0)) ; обслуживание заявки
            RELEASE     ASC1                ; освободить ГПМ1
            TRANSFER    , Lab5
Lab2        SEIZE       ASC2                ; занять ГПМ2
            ADVANCE     (Exponential(9,0,4.0)) ; обслуживание заявки
            RELEASE     ASC2                ; освободить ГПМ2
            TRANSFER    , Lab5
Lab3        SEIZE       ASC3                ; занять ГПМ3
            ADVANCE     (Exponential(3,0,4.0)) ; обслуживание заявки
            RELEASE     ASC3                ; освободить ГПМ3
            TRANSFER    , Lab5
Lab4        SEIZE       ASC4                ; занять ГПМ4
            ADVANCE     (Exponential(8,0,4.0)) ; обслуживание заявки
            RELEASE     ASC4                ; освободить ГПМ4
Lab5        ASSEMBLE 4
            SPLIT      1, Lab0
SAVEVALUE PwLine, (10000/AC1)
TERMINATE 1                                ; ВЫХОД С ЛИНИИ
START 10000
```

В настоящее время остается нерешенным ряд проблем, связанных с моделированием процессов функционирования ГАЛ и их элементов. Анализ ГПС позволяет определить характер движения материальных потоков между гибкими производственными модулями, из которых и состоит ГАЛ: последовательные, сходящиеся, расходящиеся и с обратной связью. Каждый из указанных потоков характерен для соответствующих видов соединений между ГПМ: первый – для последовательного соединения; второй – для группы параллельно работающих ГПМ; третий – для ГПМ и вспомогательного оборудования, включенных последовательно с ним; четвертый – для группы ГПМ, выполняющих технологические операции с последующим их повторением. Обычно последний вид соединений между ГПМ характерен для случаев выявления дефектных изделий или для многократных повторений некоторых технологических операций, например лакирования, нанесения слоев материала и т.д. Существует также ряд технологических процессов, в которых требуется повторная обработка изделия после контроля. В этом случае изделие направляется в определенные ГПМ для исправления. В состав ГАЛ должны входить контролирующие устройства, производящие контроль и сортировку изделий после определенных операций. В случае обнаружения исправимого брака изделие по обратной связи отправляется в отдельный ГПМ для исправления, что позволяет уменьшить количество бракованных изделий на выходе линии. Для выполнения таких технологических процессов используются ГАЛ с обратными связями. В литературе приводятся структуры ГАЛ с обратными связями, но моделирование этих линий практически не встречается.

Еще одна задача может быть сформулирована следующим образом: построить имитационную модель функционирования синхронной ГАЛ с рефлекторным управлением, содержащую 4 ГПМ, причем

в ГАЛ имеется возможность осуществить возвращение изделия на соответствующий ГПМ в случае возникновения брака. Время обработки на всех ГПМ распределено по экспоненциальному закону. Среднее время обработки принимаем равным 4 мин. Вероятность брака принята равной 0,1. Необходимо определить производительность линии.

Текст программы, разработанной для случая использования обратных связей на втором, третьем и четвертом ГПМ, приведенный ниже, снабжен комментариями и дополнительных пояснений не требует.

```
*****
; GPSS World File - Модель синхронной линии. Единица времени 1 мин
*****
      GENERATE    , , , 1

Lab0    SPLIT      1, Lab2
        SPLIT      1, Lab3
        SPLIT      1, Lab4
        SEIZE      ASC1                      ; занять ГПМ1
        ADVANCE    (Exponential(1,0,4.0))    ; обслуживание заявки
        RELEASE    ASC1                      ; освободить ГПМ1
        TRANSFER   , Lab5

Lab2    SEIZE      ASC2                      ; занять ГПМ2
Err2    ADVANCE    (Exponential(1,0,4.0))    ; обслуживание заявки
        TRANSFER   .100, , Err2              ; если брак, повторить
        RELEASE    ASC2                      ; освободить ГПМ2
        TRANSFER   , Lab5

Lab3    SEIZE      ASC3                      ; занять ГПМ3
Err3    ADVANCE    (Exponential(3,0,4.0))    ; обслуживание заявки
        TRANSFER   .100, , Err3              ; если брак, повторить
        RELEASE    ASC3                      ; освободить ГПМ3
        TRANSFER   , Lab5

Lab4    SEIZE      ASC4                      ; занять ГПМ4
Err4    ADVANCE    (Exponential(3,0,4.0))    ; обслуживание заявки
        TRANSFER   .100, , Err4              ; если брак, повторить
        RELEASE    ASC4                      ; освободить ГПМ4

Lab5    ASSEMBLE   4
        SPLIT      1, Lab0
SAVEVALUE PwLine, (10000/AC1)
TERMINATE 1                                ; ВЫХОД С ЛИНИИ
START 10000
```

Моделирование проводилось для синхронной ГАЛ без обратных связей и для ГАЛ с обратными связями на одном, двух и трех ГПМ. Для каждой модели проводилось по десять экспериментов с различными генераторами случайных событий, условием прекращения моделирования являлось прохождение через ГАЛ 10 000 заявок. Следует отметить, что изменение генераторов не оказывало влияния на результаты моделирования. Результаты моделирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования синхронной ГАЛ

Структура линии	Производительность, шт/ч	Приведенная производительность, шт/ч
Без обратных связей	7,14	5,21
С обратными связями на ГПМ 2 (3, 4)	6,96	5,64
С обратными связями на ГПМ 2 и 3 (2 и 4, 3 и 4)	6,78	6,10
С обратными связями на ГПМ 2, 3 и 4	6,60	6,60

По результатам моделирования можно сделать вывод, что приведенная производительность для линии с обратными связями выше, чем для линии без обратных связей

Проведем оценку адекватности модели САЛ с ОС на основе результатов имитационного эксперимента.

При моделировании САЛ с ОС предполагается следующее: времена обслуживания ТЯ распределены по экспоненциальному закону.

Для оценки адекватности аналитической модели проводился полный двухфакторный машинный эксперимент. В качестве факторов принимались следующие параметры: математическое ожидание времени обслуживания ТЯ (x_1), вероятность получения годных изделий на выходе каждой ТЯ (x_2). На выходе модели определялась производительность САЛ с ОС $y = f(x_1, x_2)$.

Уровни варьирования факторов:

$$\tilde{x}_1 = [3; 4,2] \text{ мин.} \quad \tilde{x}_2 = [0,7; 0,9].$$

Каждый эксперимент повторялся $n=10$ раз (в GPSS было задействовано соответствующее количество генераторов случайных чисел), поэтому для каждой точки факторного пространства были получены 10 значений отклика y .

После проведения машинного эксперимента производилась оценка среднего значения функции отклика. Итоговые результаты оценки имитационных экспериментов и аналитических исследований сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты аналитических и имитационных исследований САЛ с ОС

№ точки факторного пространства	Производительность, шт/ч		Адекватность модели, %
	Математическое ожидание по данным имитационного моделирования	По аналитической модели	
1	8,427	8,168	3,083
2	7,018	6,807	3,002
3	6,016	5,834	3,028
4	6,860	7,171	4,537
5	5,707	5,976	4,706
6	6,850	7,171	4,680

Полученные данные показывают хорошее совпадение результатов аналитического и имитационного моделирования в исследованной области значений параметров, подтверждая адекватность аналитической модели синхронной автоматизированной линии с обратными связями.

В дальнейшем планируется построить имитационную модель асинхронной ГАЛ с обратными связями, что составляет перспективу развития данного направления.

Библиографический список

1. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных линий / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. — 240 с.

Поступила в редакцию 8.10.2008 г.