

УДК 621.757

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СБОРОЧНОЙ ЛИНИИ

Кузьмиченко Б.М., Митяшин Н.П., Карпук Р.В.
Саратовский государственный технический университет, г. Саратов

Телефон: (845-2)-79-77-01 (служебный); факс: (845-2)-79-77-01; E-mail: yugol@sstu.ru

Аннотация. Описывается методика моделирования и оптимизации сборочной линии на основе универсальных сборочных модулей. Результатом исследования является разработка программного средства для оптимизации состава и структуры линии по критерию коэффициенту использования.

Ключевые слова: сборочная линия, сборочный модуль, оптимизация состава, оптимизация структуры, коэффициент использования.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка программного средства формирования и оптимизации структуры автоматической линии на основе универсальных сборочных модулей. Под универсальным модулем (УМ) здесь понимается некоторый роботизированный, легко перенастраиваемый сборочный центр. Прототипами таких модулей могут служить системы, построенные на основе линейного шагового электродвигателя с магнито-воздушным подвесом (ЛШД) [1,2].

Объектом исследования является линия, удовлетворяющая следующим условиям.

1. Линия обеспечивает выполнение n последовательных сборочных переходов.
2. Каждый переход Q_i характеризуется временем выполнения t_i , распределенного по нормальному закону с параметрами t_i^0, σ_i , и параметрами потоков отказов и восстановления центра на i -м переходе (λ_i, μ_i) .
3. Каждый универсальный УМ настроен на выполнение всех n переходов.
4. Транспортная система обеспечивает передачу любого изделия от каждого УМ к любому другому УМ при возникновении очереди из-за отсутствия свободных ячеек накопителя или технологического сбоя (сбоя в подаче или установке элемента). При этом принято допущение, что потери времени на изменение программы выполнения перехода пренебрежимо малы.
5. Для сокращения потерь времени от простоев УМ при возникновении очереди или технологического сбоя на транспортной системе предусмотрены накопители.
6. В силу различия значений t_i для разных i предусмотрена установка на один переход нескольких параллельно работающих УМ. Накопитель H_i принимает очередной спутник после выполнения i -го перехода, если в нем имеются свободные позиции, и передает спутник на следующий переход Q_{i+1} , если на нем есть свободный УМ.

Ставится задача при заданном числе N имеющихся УМ и выполнении вышеперечисленных условий определения структуры линии и минимальную суммарную емкость накопителей M , обеспечивающих требуемое значение коэффициента использования линии на выходе

$$\eta = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{прост}}}$$
, принимаемого равным 0,8. Здесь $t_{\text{раб}}$ - время рабочего состояния, $t_{\text{раб}}$ - сум-

марное время простоя линии по причине очередей или технологического сбоя.

Под структурой линии здесь понимается способ распределения УМ и накопителей между сборочными переходами.

Методы решения

С целью определения структуры линии, согласованной с технологическим процессом, построена математическая модель линии и разработан алгоритм оптимизации её структуры.

Рассмотрим i -й переход Q_i . Сопоставим ему два кортежа: $\mathcal{C}_i = \{k_i, \vec{X}_i, \vec{T}_i\}$, $\mathcal{M}_i = \{m_i, M_i\}$. Здесь \mathcal{C}_i - модель набора УМ, обеспечивающего переход Q_i . При этом k_i - число центров, обеспечивающих переход Q_i , \vec{X}_i - вектор размерности k_i , j компонента которого x_j^i равна 1, если j -ый центр занят выполнением перехода, и 0, если он свободен, \vec{T}_i - вектор времени, размерности k_i , j -я компонента которого t_j^i равна времени, оставшегося до завершения выполнения перехода j -м центром.

Кортеж \mathcal{M}_i является моделью i -ого накопителя H_i . При этом m_i - число ячеек (ёмкость) накопителя, а M_i - число свободных ячеек накопителя H_i . При этом накопитель H_n является складом готовых изделий, ёмкость которого равна L .

Модель линии представляет собой кортеж:

$$\mathcal{E} = \{ \mathcal{C}_1, H_1, \mathcal{C}_2, H_2, \dots, \mathcal{C}_n, H_n, \vec{P}_1, \vec{P}_2 \},$$

где n - число переходов, \vec{P}_1 и \vec{P}_2 - вектора потоков отказов и восстановлений, компонентами которых являются потоки отказов и восстановлений отдельных центров.

Модель работает следующим образом.

Зададимся числом изделий, которые должны быть собраны линией в единицу времени (час, сутки и т.п.). Обозначим это число через L . Фактическое число изделий, собранных на линии может оказаться меньше, чем L из-за сбоев работы УМ.

Будем считать, что спутники с корпусами изделий, на которых должны быть установлены сборочные компоненты, поступают на первый переход Q_i со склада комплектации H_0 , ёмкость которого равна L .

Если в данный момент времени t хотя бы один УМ первого перехода свободен, текущее значение l выбывших спутников из H_0 уменьшается на 1, т.е. полагается

$$l := l - 1 \tag{1}$$

При этом компонента вектора \vec{X}_1 , соответствующая свободному до этого УМ переключается от значения 0 (свободный УМ) на 1, т.е. для соответствующего номера свободного УМ полагается $x_j^1 := 1$. Кроме этого значение компоненты t_j^1 , до этого равное 0, приобретает случайное значение t^1 длительности выполнения перехода Q_1 .

Если для данного текущего момента времени t компонента t_p^1 некоторого p -го УМ первого перехода достигнет нулевого значения, то это соответствует завершению установки сборочного элемента на соответствующем УМ. При этом компонента x_p^1 , ранее равная 1, приобретает значение 0, т.е. полагается $x_p^1 := 0$, если хотя бы одна позиция накопителя H_1 свобод-

на, т.е. $M_1 > 0$. При этом величина M_1 уменьшается на 1, т.е. полагается $M_1 := M_1 - 1$. Если же $M_1 = 0$, т.е. все позиции накопителя H_1 заняты, то компонента x_p^1 не обнуляется, т.е. остается равной 1, хотя $t_p^1 = 0$. Подобные действия модель производит последовательно для всех УМ первого перехода.

Аналогично обрабатываются все переходы техпроцесса сборки в последовательности их следования на линии для данного момента времени t . Отличие состоит лишь в том, что при просмотре всех УМ перехода Q_i вместо оператора (1) выполняется оператор

$$M_{i-1} := M_{i-1} - 1.$$

В остальных операторах следует заменить индекс 1 на индекс i . После прохода всех n переходов осуществляется шаг по времени, т.е. выполняется оператор

$$t = t + h \tag{2}$$

Наряду с оператором (2) для каждого не равного 0 значения t_s^r по всем переходам S осуществляются операторы

$$t_s^r := t_s^r - h,$$

что моделирует течение переходов во времени.

После выполнения всех указанных пересчетов временных компонент осуществляется возврат модели к первому переходу и проведению всех действий, описанных выше для новых состояний векторов \vec{X}_i, \vec{T}_i и времени t . Этот переход не производится в том и только том случае, если все компоненты всех векторов \vec{X}_i, \vec{T}_i , а так же параметр l окажутся равными 0, а значения M_i совпадут со значениями m_i . Это означает, что в модели все УМ и накопители линии свободны и, следовательно, сборка изделий программы завершена.

Оптимизация структуры сборочной линии производится итеративно по объему накопителя M . Начальное значение M принимается равным 0 («жесткая» линия), в каждой следующей итерации оно увеличивается на единицу. Процесс оптимизации заканчивается, когда очередное увеличение величины M не приводит к значимому увеличению коэффициента использования, либо он достигает минимально допустимого значения (например, 0,8). При этом значение величины M и структура линии, полученные в последней итерации, считаются оптимальными.

Каждая итерация проходит в два этапа.

На первом этапе определяется распределение сборочных центров по переходам.

Естественными ограничениями при оптимизации являются:

1. Число имеющихся универсальных сборочных центров (УМ) – N .
2. Общий объем накопителей – M .

Искомым вектором на первом этапе является вектор-строка

$$\vec{k} = (k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n) \tag{3}$$

При этом вектор \vec{k} должен быть выбран так, чтобы длительности выполнения всех переходов с учетом параллельности работы УМ на одном переходе были возможно ближе друг другу (в идеале – равными). При отсутствии технологических сбоев это обеспечит минимум

времени ожидания собираемых изделий между переходами. Математически это требование может быть выражено одной из следующих формул:

$$\max_{i,j} \left(\left| \frac{t_i^0}{k_i} - \frac{t_j^0}{k_j} \right| \right) \rightarrow \min ; \quad \max_i \frac{t_i^0}{k_i} \rightarrow \min \quad (4)$$

При стремлении к выполнению условий (4), мы должны выполнять условие

$$\sum_{i=1}^n k_i = N; \quad k_i > 0. \quad (5)$$

Таким образом мы имеем следующую задачу математического программирования.

Необходимо найти целочисленный вектор \vec{k} (3) такой, чтобы выполнялись ограничение (5), а целевая функция

$$F(\vec{k}) = \max_i \frac{t_i^0}{k_i}$$

имела минимальное значение, т.е. выполнялись условия (4).

Приближенное решение этой задачи дается следующим алгоритмом.

1. Зададимся произвольным вектором \vec{k}_1 , удовлетворяющим условиям (5).
2. Найдем два перехода Q_{i_1} и Q_{i_2} , для которых выполняется

$$i_1 = \arg \max_i \frac{t_i^0}{k_i}, \quad i_2 = \arg \min_i \frac{t_i^0}{k_i}$$

Рассчитываем также величину

$$\Delta = \frac{t_{i_1}^0}{k_{i_1}} - \frac{t_{i_2}^0}{k_{i_2}}.$$

3. Положим

$$k_{i_1} := k_{i_1} + 1; \quad k_{i_2} := k_{i_2} - 1.$$

При этом k_i для $i \neq i_1$ и $i \neq i_2$ не изменяются.

Очевидно, что такие изменения вектора не нарушают первого из условий (5), однако второе условие может быть нарушено, если исходное значение k_{i_1} было равно 1. Это означает, что дальнейшее уменьшение числа УМ на переходе Q_{i_2} невозможно и в дальнейшем эту составляющую вектора k следует исключить из рассмотрения, зафиксировать значение $k_{i_2}=1$.

В этом случае алгоритм возвращается к пункту 2.

4. Рассчитаем новое значение

$$\hat{\Delta} = \frac{t_{i_1}^0}{k_{i_1}} - \frac{t_{i_2}^0}{k_{i_2}}$$

Это значение по построению меньше, чем величина Δ . Если $\hat{\Delta} > 0$, то переходим к пункту 2, иначе -к пункту 5. Это соответствует квазиоптимальному значению текущего вектора k .

5. Конец первого этапа алгоритма.

Второй этап алгоритма, заключающийся в определении объема накопителей r_i между переходами Q_i и Q_{i+1} при их общем объеме M , проводится в процессе моделирования линии, имеющей структуру, определенную на первом этапе. Моделирование производится с учетом статистики разбросов времени сборки и характеристик потоков сбоев и восстановлений.

Для небольших значений M в модели используется переборный метод, осуществляющий всевозможные варианты распределений объемов накопителей между переходами и определяющий среди них оптимальный, обеспечивающий наибольшее значение коэффициента использования при данном значении M . Для больших значений общего объема накопителей ($M > 30$) переборный метод требует больших затрат времени на моделирование, что неприемлемо с учетом итеративного характера общего алгоритма. Для больших значений M разработан генетический вариант определения оптимального объема накопителей между переходами [3].

Полученные результаты

Описанная модель и алгоритм оптимизации реализованы в виде компьютерной программы. Интерфейс программы содержит информационно справочную панель, при помощи которой задаются исходные данные проектируемой линии. Программа позволяет оптимизировать структуру линии с любым числом переходов и любым числом УМ.

Текущие и окончательные результаты работы программы отображаются в окне результатов моделирования и оптимизации, в котором приводится визуализация различных состояний УМ, возникающих в процессе моделирования. Отображение текущей статистики моделирования приведено в окне «Статистика».

Дальнейшее развитие разработанной модели предполагается в направлении учета других важных критериев и прежде всего стоимости накопителей. Ясно, что безграничное увеличение объема накопителей и соответствующее увеличение их стоимости приведет к приближению коэффициента использования к идеальному значению, равному 1. Поэтому необходима поиск компромисса между этими противоположными тенденциями.

Литература

1. Кузьмиченко Б.М. Структурно-параметрический синтез технологической системы сборки // Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении. Материалы международной конференции.- Саратов. Изд-во Сар. гос. ун-та. 1997. с. 20 – 22.
2. Белявский Е.И., Власов В.А., Зенькович В.А. и др. Позиционеры на магнито-воздушной подвеске - база для нового поколения координатных и исполнительных устройств // Электронная промышленность, 1986.- Вып. 4 (152). – С. 75 – 77.
3. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.