

УДК 621.01

О.В. Максимчук

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИКЛОГРАММ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРОВ-МЕХАНИКОВ

Совершенствование существующего и создание нового высокопроизводительного оборудования является основной тенденцией развития современного машиностроения.

Одним из путей повышения производительности и надежности технологических машин-автоматов с распределительными валами является уплотнение цикла работы, оптимизация параметров исполнительных механизмов, оптимальное распределение между ними времени кинематического цикла.

В системах управления с распределительными валами (централизованных системах) программно-носителями являются сами исполнительные механизмы. В связи с этим проектирование таких систем управления и синтез исполнительных механизмов должны осуществляться взаимосвязано.

В современной технической литературе встречается представление циклограмм сложных технологических машин в виде математических моделей взаимодействия механизмов с использованием связных ориентированных графов [1], сетевых графиков [2], векторных многоугольников [3], которые позволяют отразить все взаимосвязи между движениями исполнительных органов машины, использовать оптимизационные методы теории графов при синтезе циклограммы, сократить сроки проектирования технологических машин.

В Новосибирском технологическом институте Московского государственного университета дизайна и технологии (филиале) в курсе «Математическое моделирование механизмов и машин», предназначенном для студентов, обучающихся по специальности «Машины и аппараты текстильной и легкой промышленности», применяются модели циклограмм технологических машин с централизованной системой управления в виде ориентиро-

ванных графов [4].

Модель циклограммы машины-автомата представляют в виде ориентированного графа, в котором выделены N функциональных групп механизмов, связанных выполнением отдельных технологических операций (рис.1). Выделяют лимитирующую операцию (на рис.1 операция 19.1-19.2), от продолжительности которой главным образом зависит производительность машины. Намечают также взаимосвязи между группами механизмов (на рис.1 показаны штриховыми линиями).

Циклограммы для функциональных групп механизмов составляют в виде сетевых графиков (рис.2).

Номер каждой вершины состоит из двух цифр. Первая цифра в номере вершины – номер механизма, вторая – номер характерного положения механизма по циклограмме, которым может быть положение ведомого звена в начале и конце рабочего и холостого ходов, а также зависимое положение.

Метка у каждой вершины соответствует углу поворота главного вала станка в градусах.

Вершины сетевой циклограммы соответствуют событиям в циклограмме, то есть началу, концу рабочего хода или выстой и характерным точкам по циклограмме.

В виде дуг представлены операции цикловых механизмов (рабочий, холостой ход, выстой) или взаимосвязи между характерными точками на циклограмме, которые могут быть технологическими или кинематическими. Каждая дуга имеет две весовые характеристики - продолжительность и стоимость.

Продолжительность операции определяется величиной соответствующего фазового угла цикловой диаграммы.

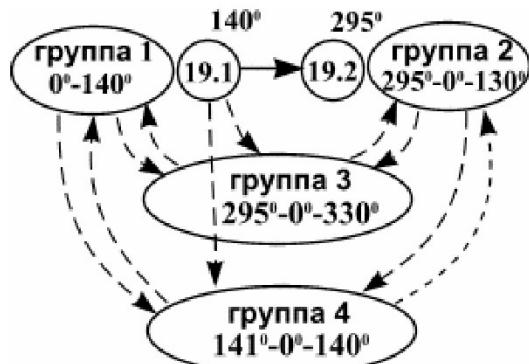


Рис. 1. Модель циклограммы станка ткацкого СТБ в виде ориентированного графа

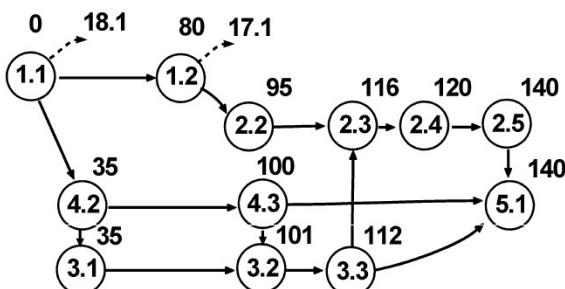


Рис.2. Модель циклограммы функциональной группы станка ткацкого СТБ

В качестве стоимости операции принятая величина максимальных контактных напряжений в высшей паре на соответствующем участке циклограммы.

В целях повышения производительности машины необходимо максимально расширить фазовый угол лимитирующей операции, что можно получить путем уплотнения циклограмм отдельных групп механизмов.

Задача оптимизации сетевой циклограммы (сетевого графика) формулируется в следующем виде [5]:

$$\text{целевая функция } [P_N - P_1] \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях

$$P_x \leq P_y - T_{x,y} \quad \text{для всех } (x,y) \quad (2)$$

$$T_{x,y} \geq [\varphi_{x,y}] \quad \text{для всех } (x,y) \quad (3)$$

где  $(x,y)$  – операция,  $x, y$  – начало и конец операции соответственно,  $P_x, P_y$  – время наступления события  $x$  или  $y$ ,  $T_{x,y}$  – продолжительность операции,  $[\varphi_{x,y}]$  – минимальный допускаемый фазовый угол для операции  $(x,y)$ ,  $N$  – номер последнего события сетевой циклограммы,  $P(1,x)$  – суммарная продолжительность операций от 1 до  $x$ ,

$$P_x = \max_A \{P(1,x)\}, \quad A \text{ – множество путей от } x \in V_G \text{ к вершине } x, \quad V_G \text{ – множество вершин графа } G.$$

вершины 1 к вершине  $x$ ,  $V_G$  – множество вершин графа  $G$ .

Таблица 1. Пример оформления задачи оптимизации циклограммы в MS Excel

Обозначение операции	Продолжительность операции, град.	Обозначение события	Время события, град.	Обозначение стоимости операции	Стоимость операции, МПа
T <sub>1,2</sub>	42	P <sub>1</sub>	0	K <sub>1,2</sub>	490
T <sub>2,3</sub>	0	P <sub>2</sub>	T <sub>1,2</sub>	K <sub>2,3</sub>	490
T <sub>1,4</sub>	72	P <sub>3</sub>	T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,3</sub>	K <sub>1,4</sub>	-3.1·T <sub>1,4</sub> + +453.93
T <sub>4,5</sub>	23	P <sub>4</sub>	T <sub>1,4</sub>	K <sub>4,5</sub>	490
T <sub>5,9</sub>	21	P <sub>5</sub>	T <sub>1,4</sub> +T <sub>4,5</sub>	K <sub>5,9</sub>	-6.2·T <sub>5,9</sub> + +249.78
T <sub>9,10</sub>	4	P <sub>6</sub>	T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub>	K <sub>9,10</sub>	-32.1·T <sub>9,10</sub> + +249.26
T <sub>10,11</sub>	20	P <sub>7</sub>	MAKC{T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,3</sub> +T <sub>3,7</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,7</sub> }	K <sub>10,11</sub>	-6.6·T <sub>10,11</sub> + +250.11
T <sub>2,6</sub>	55	P <sub>8</sub>	MAKC{T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,3</sub> +T <sub>3,7</sub> +T <sub>7,8</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,7</sub> +T <sub>7,8</sub> }	K <sub>2,6</sub>	-1.6·T <sub>2,6</sub> +235
T <sub>6,9</sub>	19	P <sub>9</sub>	MAKC{T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,3</sub> +T <sub>3,7</sub> +T <sub>7,8</sub> +T <sub>8,9</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,7</sub> +T <sub>7,8</sub> +T <sub>8,9</sub> ; T <sub>1,4</sub> +T <sub>4,5</sub> +T <sub>5,9</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,9</sub> }	K <sub>6,9</sub>	490
T <sub>3,7</sub>	55	P <sub>10</sub>	MAKC{T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,3</sub> +T <sub>3,7</sub> +T <sub>7,8</sub> +T <sub>8,9</sub> +T <sub>9,10</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,7</sub> +T <sub>7,8</sub> +T <sub>8,9</sub> +T <sub>9,10</sub> ; T <sub>1,4</sub> +T <sub>4,5</sub> +T <sub>5,9</sub> +T <sub>9,10</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,9</sub> +T <sub>9,10</sub> }	K <sub>3,7</sub>	-4.42·T <sub>3,7</sub> + +522.58
T <sub>7,8</sub>	15	P <sub>11</sub>	MAKC{T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,3</sub> +T <sub>3,7</sub> +T <sub>7,8</sub> +T <sub>8,9</sub> +T <sub>9,10</sub> +T <sub>10,11</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,7</sub> +T <sub>7,8</sub> +T <sub>8,9</sub> +T <sub>9,10</sub> +T <sub>10,11</sub> ; T <sub>1,4</sub> +T <sub>4,5</sub> +T <sub>5,9</sub> +T <sub>9,10</sub> +T <sub>10,11</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,9</sub> +T <sub>9,10</sub> +T <sub>10,11</sub> }	K <sub>7,8</sub>	-20.78·T <sub>7,8</sub> + +452.84
T <sub>8,12</sub>	28	P <sub>12</sub>	MAKC{T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,3</sub> +T <sub>3,7</sub> +T <sub>7,8</sub> +T <sub>8,9</sub> +T <sub>9,10</sub> +T <sub>10,11</sub> +T <sub>11,12</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,7</sub> +T <sub>7,8</sub> +T <sub>8,9</sub> +T <sub>9,10</sub> +T <sub>10,11</sub> +T <sub>11,12</sub> ; T <sub>1,4</sub> +T <sub>4,5</sub> +T <sub>5,9</sub> +T <sub>9,10</sub> +T <sub>10,11</sub> +T <sub>11,12</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,9</sub> +T <sub>9,10</sub> +T <sub>10,11</sub> +T <sub>11,12</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,6</sub> +T <sub>6,12</sub> ; T <sub>1,2</sub> +T <sub>2,3</sub> +T <sub>3,7</sub> +T <sub>7,8</sub> +T <sub>8,12</sub> }	K <sub>8,12</sub>	490
T <sub>6,7</sub>	0			K <sub>6,7</sub>	490
T <sub>8,9</sub>	4			K <sub>8,9</sub>	490
T <sub>6,12</sub>	43			K <sub>6,12</sub>	490
T <sub>11,12</sub>	0			K <sub>11,12</sub>	490

Следует остановиться на том, как было получено неравенство (3).

Ограничение контактных напряжений на каком-либо участке цикловой диаграммы  $\sigma_{\max}(T_{x,y}) \leq [\sigma_H]$ , где  $[\sigma_H]$  – допускаемое напряжение смятия в высшей паре, может быть преобразовано в ограничение на величину соответствующего фазового угла снизу.

Действительно, решая уравнение  $\sigma_{\max}(T_{x,y}) - [\sigma_H] = 0$  относительно  $T_{x,y}$ , получаем минимальное допускаемое значение фазового угла  $[\varphi_{x,y}]$  на участке  $(x,y)$ . Неравенство (2) отражает последовательность выполнения операций.

Параметрами, определяемыми в процессе синтеза, являются фазовые углы.

При синтезе цикловой диаграммы группы механизмов с учетом динамических характеристик в оптимизационную задачу можно вводить дополнительные ограничения на амплитуду колебаний исполнительных органов механизмов.

Для проведения оптимизации циклограммы стоимость операций и амплитуды колебаний представляют в виде функциональных зависимостей от продолжительности операций (величин фазовых углов).

Стоимости операций  $K_{x,y}$ , в качестве которых приняты максимальные контактные напряжения в высших парах на различных участках циклограммы, аппроксимируют полиномами первой степени

$$K_{x,y} = a_1 \cdot T_{x,y} + a_0.$$

Задача (1)-(3) является задачей параметрического линейного программирования. Решение оптимизационной задачи (1)-(3) проводится методом сопряженных градиентов средствами MS Excel [6]. Преимущества метода заключаются в том, что он отличается высокой надежностью и быстро сходится в окрестности точки минимума.

Данные для решения задачи (1)-(3) в MS Excel записываются в виде, представленном в табл. 1 (приведена запись данных для циклограммы на рис.1).

Затем в режиме поиска решения задается ячейка, содержащая целевую функцию, вводятся ограничения, и проводится оптимизация методом сопряженных градиентов [6].

Предлагаемая методика опробована при синтезе циклограммы ткацкого станка СТБ с углом боя 140°.

Проведен оптимизационный синтез цикловой диаграммы одной из четырех групп механизмов станка, где в качестве критерия оптимизации принята величина фазового угла операции пролета прокладчика.

В результате удалось повысить производительность одноцветного ткацкого станка СТБ с углом боя 140° на 19,5%, в том числе за счет перестройки циклограммы на 3,5%, за счет повышения частоты вращения главного вала на 16% (на 50 об/мин).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новгородцев В.А. Системный подход к оптимизации параметров механизмов технологических автоматов // Машиноведение. 1984. №2. С.59-64.
2. Цейтлин Г.Е. Проектирование систем управления машин-автоматов с распределительными валами. – М.: Машиностроение, 1983. 167 с.
3. Джомартов А.А., Ермолов А.А. Оптимизация циклограммы механизмов машины-автомата.// Машиноведение. 1987. №6. С.42-45.
4. Подгорный Ю.И., Афанасьев Ю.А., Максимчук О.В. К вопросу о циклограммировании технологических машин // Сборник научных трудов НГТУ. 1999. №3. С.145-148.
5. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах./ Пер. с англ. - М.: Мир, 1981. 323 с.
6. Курицкий Б. Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0 в примерах. – СПб.: BHV, 1997. 384 с.

Автор статьи:

Максимчук  
Ольга Владимировна  
– канд. техн. наук, доц. каф. ав-  
томатики и вычислительной тех-  
ники Новосибирского техноло-  
гического института Московско-  
го государственного университе-  
та дизайна и технологии  
(филиал)