

Г. У а л и е в, А. А. Д ж о м а р т о в

**МОДЕЛЬ ЦИКЛОГРАММЫ  
МАШИНЫ-АВТОМАТА**

*Разработана векторная модель циклограммы машины-автомата на основе представления циклограммы в виде векторных многоугольников, при этом сохранена наглядность существующих линейных циклограмм, что позволяет решать различные динамические задачи за счет изменения параметров циклограмм его механизмов. Векторная модель циклограммы машины-автомата позволяет выявить наиболее нагруженные механизмы, характеристики которых вошли в динамическую модель для наиболее точного решения конкретно поставленной задачи.*

**E-mail: legsert@mail.ru**

**Ключевые слова:** *циклограмма, машина-автомат, векторная модель, математическая модель.*

Теория циклограммирования, включающая в себя вопросы синтеза и анализа цикловых диаграмм производственных машин и автоматических линий, является одной из основных частей теории проектирования машин-автоматов [1].

Циклограмма машины-автомата — это последовательность операций, выполняемых механизмами в зависимости от углового перемещения главного вала. Циклограмма дает возможность определить состояние покоя или движения каждого исполнительного органа при любом положении главного вала.

От правильного синтеза циклограммы зависит производительность и надежность машины-автомата [2], поэтому вопросам проектирования циклограмм посвящено много научных работ. Подробный анализ исследований теории циклограммирования, выполненных до 1965 г., приведен в работе [1].

Циклограммирование современных машин-автоматов [1] требует учета физических свойств обрабатываемых материалов, температурных условий, упругости звеньев, точности изготовления и монтажа деталей, накопления и использования информации в процессе обработки при наличии обратных связей.

Различаются круговые, прямоугольные, линейные, синхронные, синангулярные циклограммы в зависимости от способа графического изображения [1].

Л.В. Петрокас [1] выполнил динамический анализ циклограмм наборных полуавтоматов, причем совмещение экспериментальных динамограмм с циклограммами позволило определить производственные сопротивления, зависящие от технологических факторов.

Ограниченность указанных графических способов изображения циклограмм заключается в том, что они не несут информации, необходимой для перестройки циклограммы. Указанные циклограммы могут использоваться только при наладке машин, но не позволяют построить алгоритм перестройки циклограмм, пригодный для реализации на ЭВМ.

К современным методам моделирования циклограмм можно отнести два: сетевой [3] и представление циклограмм в виде связанного ориентированного графа [4].

Для выявления взаимосвязей между движениями исполнительных органов сложных машин-автоматов и синтеза рациональной циклограммы строят безмасштабную модель машинного технологического процесса [3] по типу систем сетевого планирования и управления. Недостатками сетевого метода являются: плохая наглядность; непригодность алгоритма оптимизации, основанного на системах сетевого планирования и управления, для циклически работающих механизмов; не отражены необходимые условия для перестройки циклограмм.

Указанные недостатки устранены в работе [4], где циклограмма машины представлена в виде связанного ориентированного графа, при этом сохранена наглядность существующих линейных циклограмм; главное достоинство графов — использована ЭВМ для их обработки. Недостатками такого метода является отсутствие учета связей по перемещениям исполнительных органов механизмов, точности изготовления и работы механизмов при синтезе циклограммы. В качестве критерия оптимизации циклограммы принимается только цикловая производительность машины-автомата.

В результате приведенного синтеза и анализа циклограммы механизмов машины-автомата выявлена необходимость дальнейшего развития методов оптимизации циклограммы с учетом точности изготовления и работы механизмов машины-автомата, связей по перемещениям исполнительных органов механизмов, динамики механизмов машины-автоматы.

**Векторная модель циклограммы механизмов машины-автомата.** Циклограмму машины-автомата можно представить в виде векторных многоугольников [5], сохранив при этом наглядность существующих линейных циклограмм и возможности использования ЭВМ для оптимизации циклограмм механизмов машин с учетом точности их изготовления и работы, а также взаимодействия механизмов друг с другом. Для получения математической модели взаимодействия механизмов машины-автомата введем вместо отрезков линейной циклограммы векторы (рис. 1), последовательно соединенные между собой, причем векторы направлены последовательно от одного к другому. Введем следующие обозначения:  $\vec{\ell}_{ij}$  — векторы;  $n$  и  $i$  — число и но-

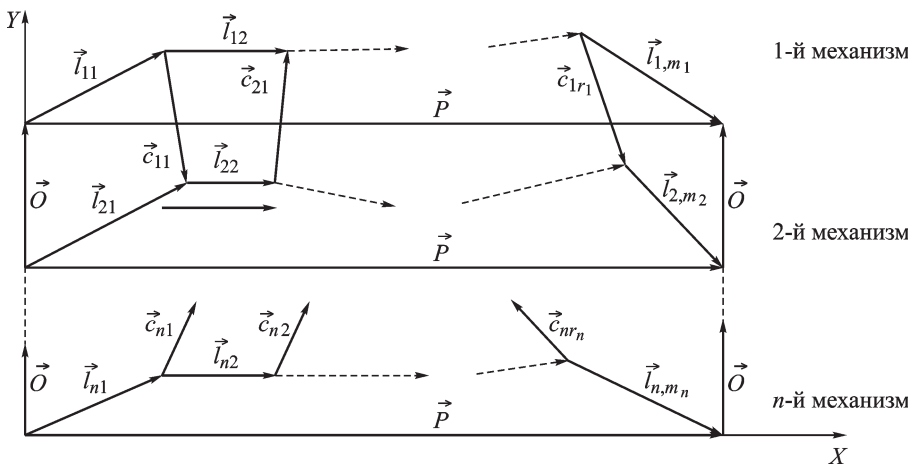


Рис. 1. Векторная модель циклограммы

мер механизма;  $j$  и  $m_j$  — номер положения и число положений  $i$ -го механизма.

Проекция векторов  $\vec{\ell}_{ij}$  на ось  $X$  характеризует  $\alpha_{ij}$  — фазовые углы срабатывания механизмов, а проекция на ось  $Y$  — ход  $\delta_{ij}$   $j$ -го положения  $i$ -го механизма как безразмерную величину

$$\delta_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_{\max}}, \quad S_{\max} = \max S_{ij}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m_i,$$

где  $S_{ij}$  — ход  $j$ -го положения  $i$ -го механизма (размерная величина).

Введем вектор  $\vec{P}$ , соединяющий точки начала и конца цикла. Проекция вектора  $\vec{P}$  на ось  $X$  равна  $2\pi$ , на ось  $Y$  равна нулю. При исследовании циклограммы машины-автомата необходимо учитывать технологические и конструктивные ограничения, т.е. точность изготовления и точность работы механизмов, а также взаимосвязь работы механизмов между собой. Взаимодействие механизмов отразим в виде векторов связи  $\vec{c}_{ik}$ , где  $k = 1, \dots, r_i$ ,  $r_i$  — число векторов связи  $i$ -го механизма, выходящих из какого-либо  $j$ -го положения. Направление векторов связи указывает на последовательность срабатывания механизмов. Проекция векторов связи на ось  $X$  характеризует запаздывание срабатывания механизма, а проекция на ось  $Y$  — разность между максимальными перемещениями механизмов.

Совместим циклограммы механизмов при помощи нулевых векторов  $\vec{O}$  (см. рис. 1), соединяющих граничные точки циклограммы механизмов по оси  $Y$ .

Составим систему векторных уравнений, описывающих работу механизмов машины-автомата в соответствии с рис. 1:

$$\sum_{j=1}^{m_i} \vec{\ell}_{ij} = \vec{P}, \quad i = 1, \dots, n; \quad \vec{c}_{ik} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} \vec{\ell}_{ij}, \quad (1)$$

где  $b_{ij} \in \{0, \pm 1\}$ .

Векторные уравнения (1) описывают совместную работу механизмов машины-автомата. Спроецируем векторные уравнения (1) на оси  $X$  и  $Y$ :

$$\sum_{j=1}^{m_i} \alpha_{ij} = 2\pi; \quad \sum_{j=1}^{m_i} \delta_{ij} = 0; \quad (2)$$

$$c_{ik}^x = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} \alpha_{ij}; \quad c_{ik}^y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} \delta_{ij}.$$

На фазовые углы  $\alpha_{ij}$  срабатывания механизмов и  $\delta_{ij}$  хода механизмов накладываем следующие ограничения:

$$\alpha_{ij} \geq \alpha_{ij}^m; \quad \delta_{ij}^B \geq \delta_{ij} \geq \delta_{ij}^H, \quad (3)$$

где  $\alpha_{ij}^m$  — минимально допустимые фазовые углы срабатывания, определяемые из условия работоспособности механизмов;  $\delta_{ij}^B, \delta_{ij}^H$  — верхний и нижний пределы, назначаемые конструктором.

Введем ограничения:

$$c_{ik}^{xB} \geq c_{ik}^x \geq c_{ik}^{xH}; \quad c_{ik}^{yB} \geq c_{ik}^y \geq c_{ik}^{yH}, \quad (4)$$

где  $c_{ik}^{xH} = e_{ik}^x + \Delta c_{ik}^x$ ;  $c_{ik}^{yH} = e_{ik}^y + \Delta c_{ik}^y$ ;  $e_{ik}^x, e_{ik}^y$  — минимально допустимые проекции векторов связи, определяемые из технологических условий;  $\Delta c_{ik}^x, \Delta c_{ik}^y$  — погрешность проекции векторов связи;  $c_{ik}^{xB}, c_{ik}^{yB}$  — верхние ограничения, накладываемые конструктором.

Уравнения (2) и ограничения (3) и (4) описывают совместную работу механизмов (циклограмму) машины-автомата.

При установившемся движении машины-автомата с централизованной системой управления распределительный вал вращается с постоянной скоростью  $\omega = \text{const}$ , тогда возможен переход к времени срабатывания механизмов  $t_{ij}$  по формуле  $t_{ij} = \alpha_{ij}/\omega$ , а период цикла  $T = 2\pi/\omega$ .

**Математическая модель движения машины-автомата с учетом циклограммы механизмов.** Машины-автоматы содержат большое число механизмов, совместная согласованная работа которых определяет работоспособность машины. Циклограмма машины-автомата является достаточно сложной, и от ее правильного построения, как показали исследования, существенно зависит ее динамика. Для того чтобы было возможным влиять на динамику машины-автоматы за счет перестройки ее циклограммы, необходимо выявить связь между дифференциальными уравнениями движения машины-автомата и уравнениями, описывающими ее циклограмму.

Рассмотрим такую связь на примере машины-автомата, состоящей из двигателя, от которого приводятся в движение через главный вал  $n$  механизмов. Динамическая модель машины-автомата представлена

в виде параллельно-последовательной колебательной системы из  $n$  механизмов с нелинейными функциями положения ведомых звеньев. Эти механизмы изображены в виде цепочки соответствующих дискретных упругих коэффициентов  $c_i$ , коэффициентов сопротивления  $\beta_i$ , инерционных ( $J_i, I_i$ ) моментов двигателя  $M_{дв}$  и сопротивления  $M_i$ , а также кинематических элементов  $\Pi_i$ , ( $i = 1, \dots, n$ ) (рис. 2).

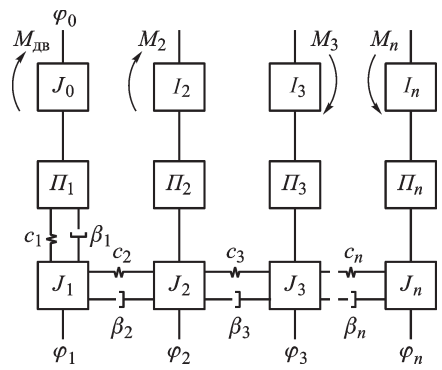


Рис. 2. Динамическая модель машины-автомата

Для составления уравнения движения механизмов машины-автомата по динамической модели (см. рис. 2) воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода с лишними координатами [6]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_j} + \frac{\partial V}{\partial \varphi_j} = Q_j + \sum_{i=1}^m \lambda_i h_{ij};$$

$$\sum_{j=1}^{m+n} h_{ij} \dot{\varphi}_j + h_i = 0,$$
(5)

где  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  —  $n$  обобщенных координат;  $\lambda_i$  — множители Лагранжа;  $h_{ij}, h_i$  — некоторые функции;  $T$  — кинетическая энергия голономной системы;  $V$  — потенциальная энергия системы;  $Q_j$  — обобщенные силы.

Для установления связи между уравнениями (2)–(4), описывающими совместную работу механизмов машины-автомата, и уравнениями динамики (5) запишем функции положения и передаточные функции механизмов машины-автомата в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Pi_i &= \Pi_{i1} [1 - L(\varphi_i - \alpha_{i1})] + \\ &+ \sum_{j=2}^m \Pi_{ij} \left[ 1 - L \left( \varphi_i - \sum_{r=1}^j \alpha_{ir} \right) \right] \cdot L \left( \varphi_i - \sum_{r=1}^{j-1} \alpha_{ir} \right); \\ \Pi'_i &= \Pi'_{i1} [1 - L(\varphi_i - \alpha_{i1})] + \\ &+ \sum_{j=2}^m \Pi'_{ij} \left[ 1 - L \left( \varphi_i - \sum_{r=1}^j \alpha_{ir} \right) \right] \cdot L \left( \varphi_i - \sum_{r=1}^{j-1} \alpha_{ir} \right); \\ \Pi''_i &= \Pi''_{i1} [1 - L(\varphi_i - \alpha_{i1})] + \\ &+ \sum_{j=2}^m \Pi''_{ij} \left[ 1 - L \left( \varphi_i - \sum_{r=1}^j \alpha_{ir} \right) \right] \cdot L \left( \varphi_i - \sum_{r=1}^{j-1} \alpha_{ir} \right), \end{aligned}$$
(6)

где  $i = 1, \dots, n$ ;  $L(x)$  — ступенчатая функция вида

$$L(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1, & x \geq 0; \end{cases}$$

$\Pi_{ij}, \Pi'_{ij}, \Pi''_{ij}$  — функция положения, первая передаточная функция, вторая передаточная функция на участках фазовых углов срабатывания механизмов  $\alpha_{ij}$ .

Выражения (6) устанавливают связь между уравнениями (5), описывающими динамику машины-автомата, и уравнениями (2)–(4) циклограммы работы машины-автомата. Данный метод позволяет решать различные оптимизационные задачи, где в качестве варьируемых параметров используются фазовые углы  $\alpha_{ij}$  и ход циклограммы машины-автомата  $\delta_{ij}$ , что дает возможность улучшить динамику только за счет изменения циклограммы механизмов.

В машиностроении широко используются машины-автоматы [7], в состав которых входят механизмы переменной структуры (МПС) с геометрическими связями. Перестройка МПС с геометрическими связями происходит при достижении некоторыми функциями обобщенных координат определенных значений. Использование метода динамического анализа МПС предусматривает, как правило, проведение поинтервального анализа, при котором уравнения движения составляются между моментами изменения структуры механизма, при которых происходят скачки параметров МПС. В момент скачка процесс численного интегрирования останавливается, записываются новые начальные условия для параметров, после этого процесс возобновляется при новых условиях. Для одного МПС данный процесс осуществляется просто, однако для машины-автомата, содержащей большое число взаимосвязанных и совместно работающих по определенной программе МПС, представляет большую сложность. В некоторых случаях порядок чередования интервалов не известен до начала анализа. Таким образом, приходится записывать уравнения и составлять программы вычислений для разных вариантов чередования интервала.

Связь между циклограммой машины-автомата с МПС и ее динамикой работы будем определять по формуле (6). Считаем, что передаточные функции  $\Pi'_{ij}, \Pi''_{ij}$  непрерывны на фазовых углах срабатывания  $\alpha_{ij}$  МПС, разрыв происходит в некоторых точках сопряжения  $\Pi'_{ij}, \Pi''_{ij}$  по циклограмме. В этих точках вместо ступенчатой функции  $L(x)$  можно использовать ее представление в виде симметричной функции Хевисайда

$$L(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1/2, & x = 0; \\ 1, & x > 0 \end{cases}$$

и для применения стандартных программ численного интегрирования

использовать следующее представление функции:

$$L(x) = \frac{1}{2} \frac{|x|^{2n+1} + x^{2n+1}}{|x|^{2n+1} + \frac{1}{2} [|x - \varepsilon|^{2n+1} - (x - \varepsilon)^{2n+1}]} = \begin{cases} 0, & x \leq 0; \\ 1/2, & x = \varepsilon/2; \\ 1, & x \geq \varepsilon, \end{cases}$$

где  $\varepsilon > 0$  — точная ширина перехода;  $n$  — выбирается из условия непрерывности производной.

**Выводы.** 1. Разработана векторная модель циклограммы на основе представления циклограммы машины-автомата в виде векторных многоугольников; сохранены наглядность существующих линейных циклограмм и возможности использования ЭВМ для оптимизации циклограмм механизмов машин с учетом точности их изготовления и работы, а также взаимодействия механизмов друг с другом.

2. Получены математическая модель машины-автомата с упругими звеньями и с учетом циклограммы ее механизмов; соотношения между уравнениями, описывающими совместную работу механизмов машины-автомата, и уравнениями динамики через функции положения и передаточные функции механизмов.

### *Пример.*

Одним из наиболее нагруженных узлов ткацких станков СТБ является батанный механизм [7]. На нем осуществляются прибор уточных нитей и непосредственное формирование ткани. Такой механизм служит направляющей при движении прокладчика, с помощью которого нить прокладывается в зев.

Батанный механизм станка СТБ включает в себя брус с продольным пазом, в котором с помощью нажимных болтов крепится бёрдо. К передней части бруса батана винтами прикреплены обоймы с зубьями. Брус болтами крепится на коротких лопастях, расположенных на подбатанном валу, который изготовлен как одно целое с двуплечими рычагами, помещающимися в верхней части герметически закрытой коробки с маслом. Коробка крепится к основанию.

На концах двуплечих рычагов укреплены ролики, соприкасающиеся с парными кулачками, сидящими на главном валу. Последний расположен в нижней части батанной коробки и составляет одно целое с парными кулачками.

Главный вал состоит из нескольких секций, связанных между собой полумуфтами. На концах секций, выходящих из коробки, помещены шариковые подшипники, рядом с которыми в коробку запрессованы полые кольца с сальниками. При вращении главного вала, а вместе с ним и парных кулачков, через ролики это движение преобразуется в качательное движение двуплечих рычагов, подбатанного вала и, в конечном счете, в движение батана.



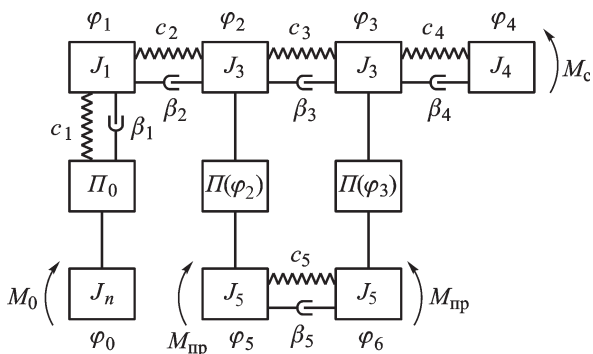


Рис. 3. Динамическая модель батанного механизма ткацкого станка СТБ-180ПН

Время и скорость движения батана (подбатанного вала, лопасти, бруса батана и бёрда) зависят от профиля спаренных кулачков.

Во время приобья уточной нити к опушке ткани зубья направляющей гребенки благодаря коротким лопастям убираются из зева под опушку ткани; в первоначальное положение зубья возвращаются при движении батана назад. Когда зубья убираются из зева, через их щель уточная нить выходит и остается в зеве, а затем прибивается к опушке ткани.

Рассмотрим динамическую модель батанного механизма ткацкого станка СТБ-180ПН, приведенную на рис. 3. Основой ее является главный вал станка, от которого приводятся в движение все его механизмы. Вращение от двигателя с моментом  $J_0 = \text{const}$  передается на главный вал через клиноременную передачу с передаточным отношением  $\Pi_0$  и жесткостью  $c_1$  и далее на шкив и крестовину фрикционной муфты с жестко закрепленным с ней тормозным барабаном, имеющим момент инерции  $J_1 = \text{const}$ .

Главный вал состоит из трех участков, имеющих жесткость на кручение  $c_2, c_3, c_4$  и коэффициенты сопротивления  $\beta_2, \beta_3, \beta_4$ ;  $J_2 = \text{const}$  — момент инерции кулачкового вала первой батанной коробки;  $J_3 = \text{const}$  — момент инерции кулачкового вала второй батанной коробки;  $J_4$  — момент инерции механизмов уточно-боевой и приемной коробок и каретки механизмов смены утка, приведенных к трехпазовому кулачку;  $J_5, c_5, \beta_5$  — соответственно момент инерции батана, жесткость и коэффициент сопротивления подбатанного вала;  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  — независимые обобщенные координаты, определяющие абсолютные угловые перемещения вращающихся масс;  $\varphi_5 = \Pi(\varphi_2), \varphi_6 = \Pi(\varphi_3)$  — функции положения батанного механизма;  $M_D$  — момент движущихся сил электродвигателя;  $M_{np}$  — момент сил приобья на батане;  $M_c$  — момент сил сопротивления.

Данная динамическая модель описывается следующими уравнениями (7):



$$\left. \begin{aligned}
 & J_0 \ddot{\varphi}_0 + c_1 (\Pi_0 \varphi_0 - \varphi_1) + \beta_1 (\Pi_0 \dot{\varphi}_0 - \dot{\varphi}_1) = M_D; \\
 & J_1 \ddot{\varphi}_1 + c_1 (\varphi_1 - \Pi_0 \varphi_0) + c_2 (\varphi_1 - \varphi_2) + \\
 & \quad + \beta_1 (\dot{\varphi}_1 - \Pi_0 \dot{\varphi}_0) + \beta_2 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) = 0; \\
 & J_2 \ddot{\varphi}_2 + c_2 (\varphi_2 - \varphi_1) + c_3 (\varphi_2 - \varphi_3) + \beta_2 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + \beta_3 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = \\
 & \quad = [-M_{np} - J_5 \ddot{\varphi}_5 - c_5 (\varphi_5 - \varphi_6) - \beta_5 (\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6)] \Pi'(\varphi_3); \\
 & J_3 \ddot{\varphi}_3 + c_3 (\varphi_3 - \varphi_2) + c_4 (\varphi_3 - \varphi_4) + \beta_3 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) + \beta_4 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) = \\
 & \quad = [-M_{np} - J_5 \ddot{\varphi}_6 - c_5 (\varphi_6 - \varphi_5) - \beta_5 (\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_5)] \Pi'(\varphi_3); \\
 & J_4 \ddot{\varphi}_4 + c_4 (\varphi_4 - \varphi_5) + \beta_4 (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_3) = -M_c,
 \end{aligned} \right\} (7)$$

где

$$\begin{aligned}
 \dot{\varphi}_5 &= \Pi'(\varphi_2) \dot{\varphi}_2; & \ddot{\varphi}_5 &= \Pi''(\varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 + \Pi'(\varphi_2) \ddot{\varphi}_2; \\
 \dot{\varphi}_6 &= \Pi'(\varphi_3) \dot{\varphi}_3; & \ddot{\varphi}_6 &= \Pi''(\varphi_3) \dot{\varphi}_3^2 + \Pi'(\varphi_3) \ddot{\varphi}_3.
 \end{aligned}$$

На рис. 4 сплошными линиями показана линейная циклограмма пяти наиболее важных механизмов ткацкого станка СТБ-180ПН, где цифрами обозначены следующие механизмы: 1 — батанный механизм; 2 — возвратчик прокладчиков утка; 3 — боевой механизм; 4 — компенсатор утка; 5 — подъемник прокладчиков утка.

Представим циклограмму пяти наиболее важных механизмов ткацкого станка СТБ-180ПН в векторном виде [1] (рис. 5). Запишем проекции на ось  $X$  векторных уравнений, описывающих совместную работу механизмов станка, следующим образом:

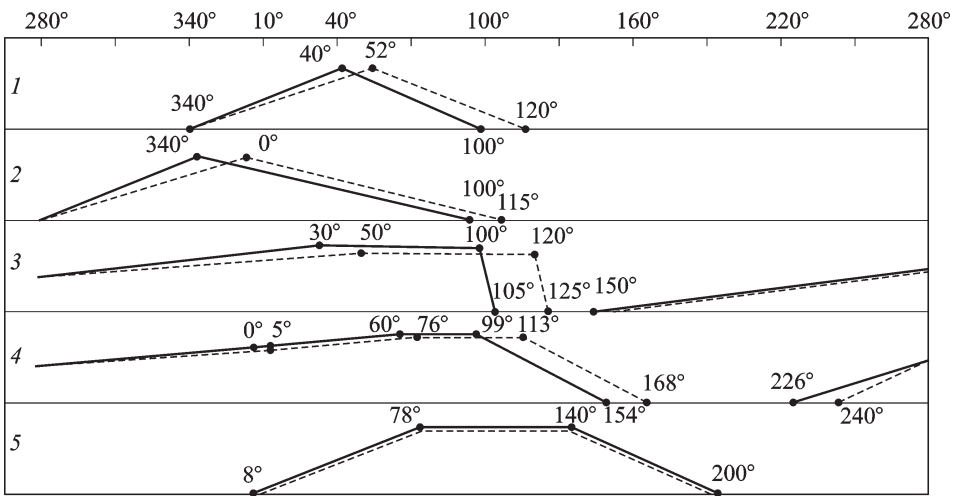


Рис. 4. Линейная циклограмма пяти наиболее важных механизмов ткацкого станка СТБ-180ПН

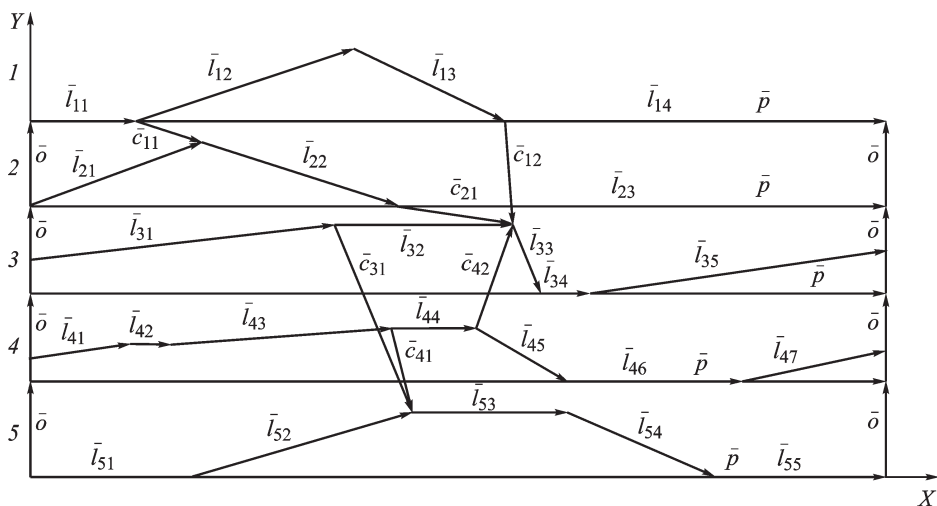


Рис. 5. Векторная циклограмма пяти наиболее важных механизмов ткацкого станка СТБ-180ПН

$$\begin{aligned}
 \alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{13} + \alpha_{14} &= 2\pi; \\
 \alpha_{21} + \alpha_{22} + \alpha_{23} &= 2\pi; \\
 \alpha_{31} + \alpha_{32} + \alpha_{33} + \alpha_{34} + \alpha_{35} &= 2\pi; \\
 \alpha_{41} + \alpha_{42} + \alpha_{43} + \alpha_{44} + \alpha_{45} + \alpha_{46} + \alpha_{47} + \alpha_{48} &= 2\pi; \\
 \alpha_{51} + \alpha_{52} + \alpha_{53} + \alpha_{54} + \alpha_{55} &= 2\pi; \\
 c_{11}^x &= \alpha_{21} - \alpha_{11}; \\
 c_{12}^x &= \alpha_{31} + \alpha_{32} - \alpha_{11} - \alpha_{12} - \alpha_{13}; \\
 c_{21}^x &= \alpha_{31} + \alpha_{32} - \alpha_{21} - \alpha_{22}; \\
 c_{31}^x &= \alpha_{51} + \alpha_{52} - \alpha_{31}; \\
 c_{41}^x &= \alpha_{51} + \alpha_{52} - \alpha_{41} - \alpha_{42} - \alpha_{43}; \\
 c_{42}^x &= \alpha_{31} + \alpha_{32} - \alpha_{41} - \alpha_{42} - \alpha_{43} - \alpha_{44}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

На фазовые углы механизмов и проекции векторов связи накладываем следующие ограничения:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{ij} &\geq \alpha_{ij}^{\min}, \quad c_{11}^x \geq 1^\circ, \quad c_{12}^x \geq 0^\circ 30', \\
 c_{21}^x &\geq 9^\circ, \quad c_{31}^x \geq 0^\circ 30', \quad c_{41}^x \geq 4^\circ, \quad c_{42}^x \geq 5^\circ.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Значения  $\alpha_{ij}^{\min}$  приведены в таблице.

Таблица

Значения фазовых углов батанного механизма  $\alpha_{ij}^{\min}$ , градус

Механизм $i$	Положение $j$ $i$ -го механизма						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	60	60	0	–	–	–
2	60	70	0	–	–	–	–
3	70	0	2	10	60	–	–
4	60	3	30	60	50	0	30
5	0	70	0	60	0	–	–

Представим функции положения  $\Pi(\varphi_2)$ ,  $\Pi(\varphi_3)$  и передаточные функции  $\Pi'(\varphi_2)$ ,  $\Pi'(\varphi_3)$ ,  $\Pi''(\varphi_2)$ ,  $\Pi''(\varphi_3)$  батанного механизма в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Pi(\varphi_i) &= \Pi_{11} [1 - L(\varphi_i - \alpha_{11})] + \\ &+ \sum_{j=2}^4 \Pi_{1,j} \left[ 1 - L\left(\varphi_i - \sum_{r=1}^j \alpha_{1r}\right) \right] \cdot L\left(\varphi_i - \sum_{r=1}^{j-1} \alpha_{1r}\right); \\ \Pi'(\varphi_i) &= \Pi'_{11} [1 - L(\varphi_i - \alpha_{11})] + \\ &+ \sum_{j=2}^4 \Pi'_{1,j} \left[ 1 - L\left(\varphi_i - \sum_{r=1}^j \alpha_{1r}\right) \right] \cdot L\left(\varphi_i - \sum_{r=1}^{j-1} \alpha_{1r}\right); \\ \Pi''(\varphi_i) &= \Pi''_{11} [1 - L(\varphi_i - \alpha_{11})] + \\ &+ \sum_{j=2}^4 \Pi''_{1,j} \left[ 1 - L\left(\varphi_i - \sum_{r=1}^j \alpha_{1r}\right) \right] \cdot L\left(\varphi_i - \sum_{r=1}^{j-1} \alpha_{1r}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $i = 2, 3$ ;  $L(x)$  – ступенчатая функция вида

$$L(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ 1, & x \geq 0. \end{cases}$$

Уравнения (10) устанавливают связь между динамикой батанного механизма (уравнение (7)) и циклограммой механизмов станка (уравнения (8), (9)).

В качестве критерия оптимизации циклограммы принимаем коэффициент динамичности батанного механизма  $K_d = \max(|\ddot{\varphi}_5/\ddot{\varphi}_5^0| + |\ddot{\varphi}_6/\ddot{\varphi}_6^0|)$ , где  $\ddot{\varphi}_5^0$ ,  $\ddot{\varphi}_6^0$  – ускорения батанного механизма без учета упругости валов. Решаем следующую оптимизационную задачу:

$$K_d \rightarrow \min. \quad (11)$$

В качестве варьируемых параметров берем фазовые углы батанного механизма  $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{14}$ .

В результате решения задачи (11) получаем оптимальную циклограмму станка СТБ-180 с пневматическим соплом. Линейная оптимальная циклограмма изображена на рис. 4 пунктирными линиями. В результате оптимизации циклограммы ткацкого станка СТБ-180ПН значение коэффициента динамичности батанного механизма уменьшилось на 5%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Петрокас Л. В. Вопросы теории циклограммирования производственных машин и автоматических линий // Теория машин-автоматов и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1970. – С. 22–36.

2. Артобелевский И. И. Задачи теории машин и механизмов в развитии методов расчета и проектирования машин автоматического действия // Сессия АН СССР по научн. пробл. автоматиз. производства. Т. VI. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 345–350.
3. Цейтлин Г. В. Циклограммирование сложных технологических машин-автоматов // Машиноведение. – 1975. – № 3. – С. 49–53.
4. Новгородцев В. А. Представление цикловой диаграммы машины в виде графа // Теория механизмов и машин. – 1982. – Вып. 33. – С. 57–60.
5. Джомартов А. А., Ермолов А. А. Оптимизация циклограммы механизмов машины-автомата // Машиноведение. – 1987. – № 6. – С. 42–45.
6. Вульфсон И. И. Динамические расчеты цикловых механизмов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 328 с.
7. Уалиев Г., Джомартов А. А. Динамика механизмов ткацких станков-автоматов СТБ. – Алматы: Тауар, 2003. – 377 с.

Статья поступила в редакцию



Асылбек Абдразакович Джомартов родился в 1961 г., окончил факультет прикладной механики и математики Казахского государственного университета им. С.М. Кирова в 1983 г. Д-р техн. наук, заместитель директора по науке Института механики и машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова МОН Республики Казахстан. Автор 56 научных работ, в том числе двух монографий в области исследования динамики машин-автоматов с упругими звеньями с учетом циклограммы механизмов.

A.A. Dzhomartov (b. 1961) graduated from mechanical and mathematical faculty of the Kazakhstan State University n.a. S.M. Kirov in 1983. D. Sc. (Eng.), deputy director in science of the Institute of Mechanics and Science of Machines n. a. U.A. Dzholdasbekov. Author of 56 publications in the field of study of dynamics of automatic machines with elastic links with allowance for mechanisms' sequence diagram.



Гахип Уалиев родился в 1941 г., окончил механико-математический факультет Казахского государственного университета им. С.М. Кирова в 1965 г. Д-р техн. наук, профессор, академик Национальной академии наук Республики Казахстан, зав. лабораторией Института механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова МОН Республики Казахстан (ИММаш). Автор более 150 научных работ в области механики машин.

G. Ualiev (b. 1941) graduated from mechanical and mathematical faculty of the Kazakhstan State University n.a. S.M. Kirov in 1965. D. Sc. (Eng.), professor, academician of the National Academy of Sciences of Republic of Kazakhstan, head of laboratory of the Institute of Mechanics and Science of Machines n. a. U.A. Dzholdasbekov. Author of more than 150 publications in the field of study of mechanics of machines.