

УДК 621

Д. С. Жарких, аспирант, А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» г. Донецк, ДНР,
Россия
Тел./Факс: +7 (949) 366-85-14 E-mail: den.zharkikh@mail.ru

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПРИНЦИПИАЛЬНО-СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОТОЧНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

В статье рассматривается методика синтеза принципиально-структурных моделей поточно-пространственных технологических модулей (ППТМ), предназначенных для создания поточно-пространственных технологических систем (ППТС) непрерывного действия. Показано, что эффективное проектирование таких систем возможно на основе формального описания объемно-пространственных структур и принципиальных кинематических схем с применением методов декомпозиции и композиции. Предложен алгоритм синтеза принципиально-структурных моделей ППТМ, основанный на разложении сложных структур на элементарные движения и элементы с последующим формированием упорядоченных кортежей. Рассмотрены примеры синтеза ППТМ с различным числом входных и выходных потоков предметов обработки, а также особенности пространственного движения базовых технологических воздействий. Проанализированы способы организации загрузки и выгрузки предметов обработки простой и сложной конфигурации и показано их влияние на кинематические и динамические характеристики ППТМ. Полученные результаты расширяют возможности автоматизированного проектирования ППТС высокой производительности и сложной пространственной структуры.

Ключевые слова: поточно-пространственная технологическая система, поточно-пространственный технологический модуль, принципиально-структурная модель, объемно-пространственная структура, кинематическая схема, декомпозиция, композиция, предметы обработки.

D. S. Zharkikh, A. N. Mikhailov

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF PRINCIPAL AND STRUCTURAL MODELS OF CONTINUOUS FLOW-SPACE TECHNOLOGICAL SYSTEMS

The paper presents a methodology for the synthesis of principal structural models of flow-type technological machines (FTMs) intended for the development of continuous flow-type technological systems (FTTSs). It is shown that efficient design of such systems can be achieved on the basis of a formal description of volumetric-spatial structures and principal kinematic schemes using decomposition and composition methods. An algorithm for the synthesis of principal structural models of FTMs is proposed, which is based on the decomposition of complex structures into elementary motions and elements followed by the formation of ordered tuples. Examples of FTM synthesis with different numbers of input and output workpiece flows are considered, as well as the features of spatial motion of basic technological actions. Methods for organizing the loading and unloading of workpieces of simple and complex configurations are analyzed, and their influence on the kinematic and dynamic characteristics of FTMs is demonstrated. The obtained results expand the possibilities of automated design of high-performance FTTSs with complex spatial structures.

Keywords: flow-spatial technological system, flow-spatial technological module, fundamental structural model, volumetric-spatial structure, kinematic diagram, decomposition, composition, processing objects.

1. Введение

Ускорение темпов технического прогресса является одной из основных задач в развитии машиностроения [1, 2]. Однако это не мыслимо без дальнейшего развития технологических систем, осуществляющих производственные процессы получения промышленной продукции [3, 4]. В свою очередь, их дальнейшее развитие невозможно без перехода от решения локальных проблем автоматизации к реализации принципов

комплексной автоматизации производственных процессов. Такая же, тенденция особенно рельефно, наблюдается в электронной, медицинской, авиационной и энергетической промышленности при разработке высокоинтенсивных технологических процессов и создания на их основе высокоэффективных технологических систем. Вместе с тем, несмотря на достигнутые успехи в этом направлении, запросы практики вызывают необходимость дальнейшего повышения уровня автоматизации производственных процессов на основе создания качественно новых технологических систем – ППТС непрерывного действия [5, 6].

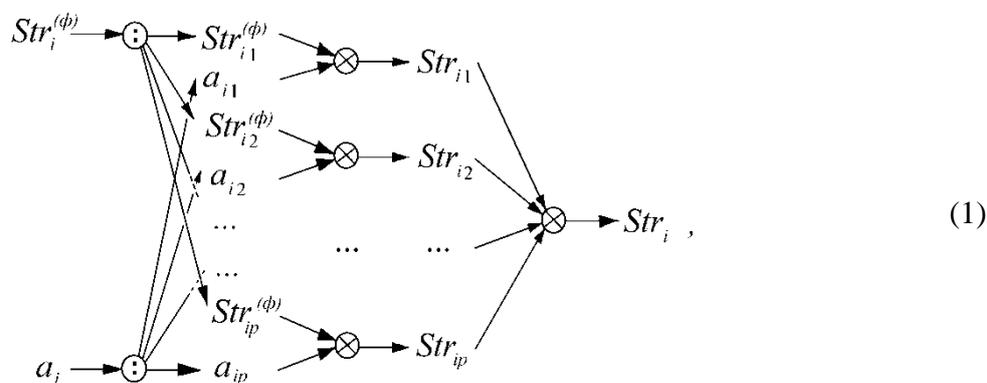
Целью работы является разработка и обоснование методики синтеза принципиально-структурных моделей поточно-пространственных технологических машин на основе декомпозиции и композиции объемно-пространственных структур и принципиальных кинематических схем для повышения уровня автоматизации и эффективности проектирования ППТС непрерывного действия.

2. Общая часть работы

При проектировании принципиально-структурных моделей ППТС возникают большие трудности из-за наличия значительного числа элементов и подсистем объемно-пространственной структуры модели и сложного состава принципиальной кинематической схемы ППТМ, а также в связи с большим перебором различных вариантов моделей и схем при их генерировании. Это приводит к возникновению задач большой размерности. Однако эти трудности легко преодолеваются при автоматизированном проектировании ППТМ и использования методов технической кибернетики, такие как декомпозиция и объединения (композиция) элементов моделей и схем [6].

В основу методики синтеза принципиально-структурных моделей ППТМ положена операция декомпозиции объемно-пространственной структурной модели и принципиальной кинематической схемы ППТМ на элементарные структуры $Str_{ik}^{(\phi)}$ и движения a_{ik} , затем объединения соответствующих элементарных структур $Str_{ik}^{(\phi)}$ и движений a_{ik} в упорядоченные пары и далее объединения этих упорядоченных пар в общую принципиально-структурную модель ППТМ. С помощью таких процедур и использования ЭВМ можно создавать любые типа принципиально-структурных моделей ППТМ. Кроме того, можно генерировать большое число вариантов принципиально-структурных моделей и вести их исследования в зонах далеких от того, что лежит на виду [3].

В схематическом виде процедура синтеза принципиально-структурных моделей ППТМ представляется зависимостью [5]:



где Str_i – структура принципиально-структурной модели i-го ППТМ;

Str_{ik} – структура k -го кортежа i -го ППТМ;

⊙ – знак декомпозиции объемно-пространственной структурной модели и принципиальной кинематической схемы;

⊗ – знак (оператор) объединения элементов.

Сущность оператора декомпозиции ⊙ заключается в расчленении на p взаимосвязанных локальных элементарных составляющих модели $Str_i^{(\Phi)}$ и схемы a_i . Объемно-пространственная структурная модель и принципиальная кинематическая схема ППТМ, как правило, легко распараллеливаются с помощью метода декомпозиции, и поэтому декомпозиция сложных структур наиболее эффективна при наличии многопроцессорных вычислительных машин. Заметим, что декомпозиция $Str_i^{(\Phi)}$ и a_i может выполняться параллельно или последовательно в зависимости от оперативных возможностей ЭВМ.

Разделение множеств $Str_i^{(\Phi)}$ и a_i должно производиться до тех пор, пока они не будут расчленены на простые элементы, которые можно представить множествами. Далее, выполняется объединение элементов множеств в упорядоченные пары (кортежи). После чего реализуется объединение кортежей в принципиально-структурную модель, которая может быть представлена множеством кортежей (1):

$$Str_i = \{Str_{i1}, Str_{i2}, \dots, Str_{ip}\}. \quad (2)$$

Таким образом, при синтезе принципиально-структурных моделей ППТМ выполняется двойная композиция элементов кортежей и кортежей. При этом управляемыми переменными являются структурные параметры $Str_i^{(\Phi)}$ объемно-пространственной структурной модели и кинематические параметры a_i принципиальной кинематической схемы ППТМ [5].

Решение задачи синтеза существенно облегчается при использовании автоматизированного проектирования, обеспечивающего выполнение на ЭВМ аналитических расчетов и построение принципиально-структурных моделей проектируемых ППТМ. Это обеспечивается благодаря формальному представлению этих моделей на соответствующем алгоритмическом языке. Получение описания принципиально-структурных моделей ППТМ является исходной информацией для последующего этапа проектирования параметризации и компоновки ППТМ.

При завершении синтеза принципиально-структурной модели 1-го ППТМ, начинается построение принципиально-структурной модели 2-го ППТМ, затем 3-го ППТМ и так далее до полного создания всех принципиально-структурных моделей ППТМ.

На рисунке 1 приведены принципиально-структурные модели ППТМ, выполненные на базе объемно-пространственной структурной модели с подсистемами второго класса. Однако в практике синтеза ППТМ могут быть случаи, когда композиция принципиально-структурных моделей выполняется на основе объемно-пространственной структурной модели с подсистемами третьего класса, четвертого класса и более высокого класса.

В качестве примера проведем синтез принципиально-структурной модели ППТМ на основе объемно-пространственной структурной модели с подсистемами третьего класса. При этом возьмем принципиальную кинематическую схему четвертой подгруппы третьей группы [5]. Эта принципиальная кинематическая схема состоит из трех элементарных движений: a_{i1} – прямолинейное осевое движение, a_{i2} – вращательное движение, a_{i3} – вращательное движение. Каждое из сочетаемых элементарных

движений, рассматриваемое в отдельности, является простым, а результирующая их – сложным транспортным движением, которое выполняется по винтовой поперечной эпициклоиде, траекторию которой можно представить выражением [5]:

$$\begin{cases} x_i = r + R \cos 2\pi n_3 T \left(\frac{1 + v_{i2}}{v_{i2}} \right); \\ y_i = R \sin 2\pi n_3 T \left(\frac{1 + v_{i2}}{v_{i2}} \right); \\ z_i = \frac{n_3 T t_1}{v_{i2}}, \end{cases} \quad (3)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты траектории движение БТВ;

R – радиус основной окружности подсистем второго класса;

r – радиус основной окружности подсистем третьего класса;

n_3 – частота вращательного движения a_{i3} ;

t_1 – осевой шаг элементов подсистем первого класса;

v_{i2} – количество позиций подсистем первого класса в позиции подсистемы второго класса;

T – время.

Принимая $k_0 = 1$ и используя выражения работы [6], определяем функциональную зависимость элементарных движений [6, 7]:

$$w_{Tp2} = \frac{w_{Tp3}}{v_{i2}}; \quad (4)$$

$$v_{Tp1} = \frac{t_1 w_{Tp2}}{2\pi}, \quad (5)$$

где w_{Tp3} – угловая скорость вращательного движения a_{i3} ;

w_{Tp2} – угловая скорость вращательного движения a_{i2} ;

v_{Tp1} – линейная скорость осевого прямолинейного движения a_{i1} .

Беря во внимание особенности работы модуля, объемно-пространственную структурную модель и принципиальную кинематическую схему синтезируемого ППТМ можно записать с помощью множеств [6]:

$$Str_i^{(\Phi)} = \{Str_{i1}^{(\Phi)}, Str_{i2}^{(\Phi)}, Str_{i3}^{(\Phi)}\}, \quad (6)$$

$$a_i = \{a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}\}, \quad (7)$$

Учитывая это, принципиально-структурную модель ППТМ представляем множеством кортежей:

$$Str_i = \left\{ \left(Str_{i1}^{(\Phi)}, a_{i1} \right), \left(Str_{i2}^{(\Phi)}, a_{i2} \right), \left(Str_{i3}^{(\Phi)}, a_{i3} \right) \right\}, \quad (8)$$

Машинная реализация принципиально-структурных моделей ППТМ выполняется на ЭВМ по схеме зависимости (1).

На рисунке 1 представлена принципиально-структурная модель ППТМ, составленная на основании выражения (8). Здесь БТВ 1 имеют пространственно-временную компоновку, благодаря которой они перемещаются по винтовой поперечной эпициклоиде 2 за счет двух вращательных движений a_{i3} , a_{i2} и осевого прямолинейного движения a_{i1} . Для этого, подсистемы 3 первого класса последовательно располагаются на каждой позиции подсистем 4 второго класса с фазовым смещением, которое определяется по формуле [6]:

$$t = \frac{t_1}{v_{i2}}, \tag{9}$$

где t_ϕ - величина осевого фазового смещения подсистем первого класса в каждой позиции подсистем второго класса.

При этом подсистемы 4 второго класса на каждой позиции подсистемы 5 третьего класса должны быть последовательно повернуты относительно друг друга на фазовый угол:

$$\gamma_\phi = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{2\pi}, \tag{10}$$

где γ_ϕ – фазовый угол последовательного поворота подсистемы второго класса относительно друг друга на каждой позиции подсистемы третьего класса;

α_1 – угол между подсистемами первого класса на позиции подсистемы второго класса;

α_2 – угол между подсистемами второго класса в подсистеме третьего класса.

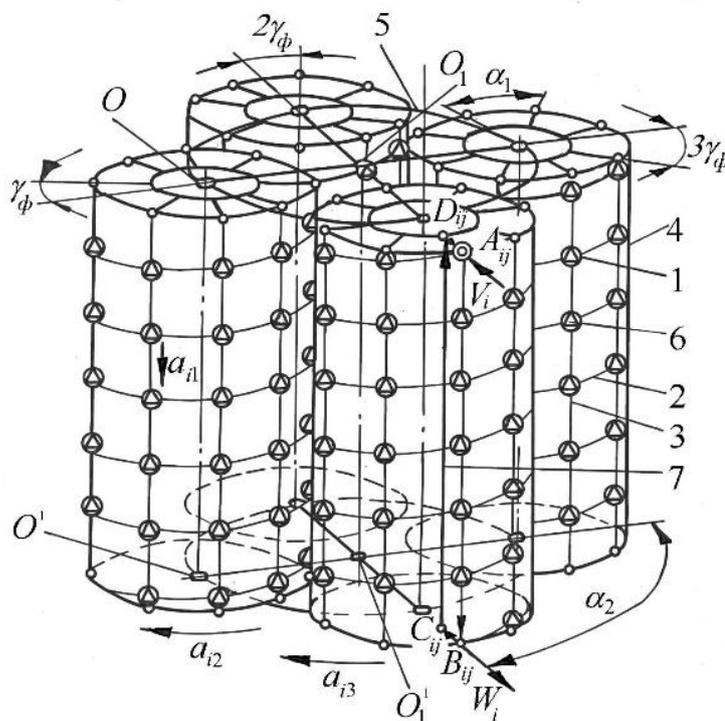


Рисунок 1. Принципиально-структурная модель ППТМ

Благодаря такой компоновки блоки технологического воздействия (БТВ) 1 по подсистемам, обеспечивается их пространственное движение по одной пространственной траектории 2, что позволяет вести загрузку предметов обработки (ПО) 6 по одному потоку v_i и их выгрузку по одному потоку w_i .

При совместном движении БТВ 1 и ПО 6 реализуется технологическое воздействие орудий и средств обработки на ПО 6. При этом БТВ 1 непрерывно циркулируют по замкнутым рекуррентным траекториям 7, позиции подсистем первого класса – по замкнутым рекуррентным траекториям вращательного движения a_{i2} , а позиции подсистем второго класса – по замкнутым рекуррентным траекториям вращательного движения a_{i3} [7].

В практике проектирования ППТМ встречаются случаи, когда одно загрузочное или разгрузочное устройство не успевает производить загрузку или разгрузку ПО в БТВ ППТМ. Поэтому на ППТМ устанавливается несколько загрузочных и разгрузочных устройств и ПО поступают по нескольким входным потокам $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}$, а выгружаются по нескольким выходным потокам $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}$. В общем случае, число входных потоков может быть не равно числу выходных потоков ПО.

Кроме того, при обработке ПО нескольких номенклатур, в ряде случаев применяются ППТМ с несколькими входными и выходными потоками ПО.

В этих случаях, при синтезе принципиально-структурных моделей ППТМ необходимо учитывать требуемое число входных и выходных потоков ПО и в соответствии с этим задавать число пространственных траекторий относительного движения потоков ПО в ППТМ путем введения соответствующих функциональных зависимостей между элементарными движениями принципиальной кинематической схемы транспортного движения БТВ и ППТМ.

На рисунке 2 приведена принципиально-структурная модель ПВТМ с тремя входными потоками ПО v_{i1}, v_{i2}, v_{i3} и тремя выходными потоками ПО w_{i1}, w_{i2}, w_{i3} . Построение этой принципиально-структурной модели ПВТМ выполняется аналогично принципиально-структурной модели, представленной на рисунке 1. Однако здесь элементарные движения a_{i1} и a_{i2} имеют следующую функциональную зависимость [5]:

$$v_{Tp1} = \frac{k_0 t_1 w_{Tp2}}{2\pi}, \quad (11)$$

где k_0 – число заходов винтовых траекторий ($k_0 = 3$).

В принципиально-структурной модели ПВТМ (рисунок 2), БТВ 1 перемещаются по винтовым траекториям 2 и располагаются осевыми потоками 3. ПО 4 поступают в ПВТМ посредством трех транспортных роторов 5, 6, 7 по входным потокам v_{i1}, v_{i2}, v_{i3} , а выгружаются тремя транспортными роторами 8, 9, 10 по выходным потокам w_{i1}, w_{i2}, w_{i3} . При совместном движении БТВ 1 и ПО 4 реализуется технологическое воздействие орудий и средств обработки на ПО 4. При этом БТВ 1 непрерывно циркулируют по замкнутым рекуррентным траекториям 11, индивидуальным для каждого осевого потока 3.

Принципиально-структурная модель ПСТМ с двумя входными потоками v_{i1}, v_{i2} и двумя выходными потоками w_{i1}, w_{i2} приведена на рисунке 3. Здесь функциональная зависимость элементарных движений и определяется на основании выражений, представленных в работе [6], однако для приведенной принципиально-структурной модели значение $k_0 = 2$. В принципиально-структурной модели, БТВ 1 перемещаются по спиральным траекториям 2 и располагаются радиальными потоками 3. ПО 4 поступают в

ПСТМ посредством двух транспортных роторов 5 и 6 по входным потокам v_{i1} и v_{i2} , а выгружаются двумя транспортными роторами (на рисунке 3 не показаны) по выходным потокам w_{i1} и w_{i2} . Только при совместном движении БТВ 1 и ПО 4 выполняется технологическое воздействие орудий и средств обработки на ПО 4. При этом БТВ 1 также непрерывно циркулируют по замкнутым траекториям 7, индивидуальным для каждого радиального потока 3 [6, 7].

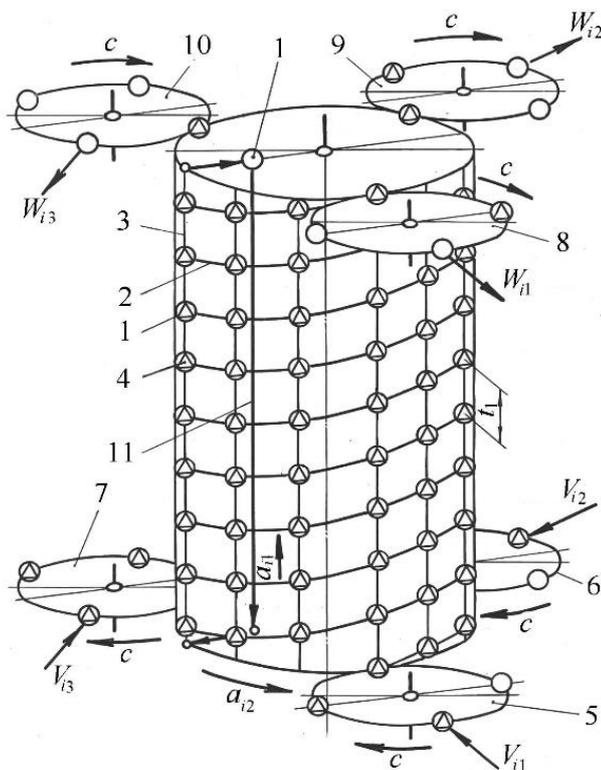


Рисунок 2. Принципиально-структурная модель ПВТМ с тремя входными и выходными потоками ПО

При проектировании ППТМ в ряде случаев возникает проблема решения вопроса загрузки и выгрузки ПО сложной конфигурации. Это связано с тем, что в зоне загрузки и выгрузки ПО, несущие органы и приемники смежных ППТМ совершают сложные транспортные движения. При этом из-за сложной конфигурации ПО и сложной кинематики транспортного движения иногда затрудняется загрузка и выгрузка ПО.

Отметим, что ПО простой формы передаются от предыдущего к последующему ППТМ обычными методами, применяемыми в роторных линиях, например, с помощью транспортных роторов или непосредственно от ППТМ к ППТМ.

Для сложной формы ПО, упрощение процесса загрузки и выгрузки ПО с ППТМ, может быть достигнуто при использовании следующих способов:

1. При поступлении несущих органов или приемников БТВ в зону загрузки или выгрузки ПО с ППТМ производится остановка одного или нескольких элементарных движений принципиальной кинематической схемы ППТМ во всех позициях всех классов подсистем объемно-пространственной структурной модели ППТМ.

2. При поступлении несущих органов или приемников БТВ в зону загрузки или выгрузки ПО с ППТМ производится остановка одного или нескольких элементарных

движений принципиальной кинематической схемы ППТМ во всех позициях подсистем только тех классов объемно-пространственной структурной модели ППТМ, которые находятся в зонах загрузки или выгрузки ПО.

3. При поступлении несущих органов или приемников БТВ в зону загрузки или выгрузки ПО с ППТМ производится остановка одного или нескольких элементарных движений принципиальной кинематической схемы ППТМ в одной позиции подсистем только тех классов объемно-пространственной структурной модели, которые находятся в зонах загрузки и выгрузки ПО [7].

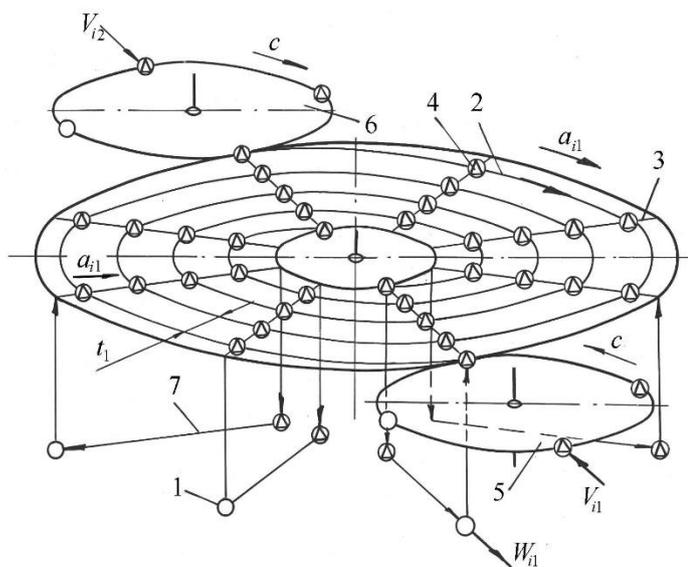


Рисунок 3. Принципиально-структурная модель ПСТМ с двумя входными и выходными потоками ПО

Такие граничные решения позволяют упростить процесс загрузки и выгрузки ПО сложной формы за счет упрощения кинематики сложной структуры принципиальной кинематической схемы транспортного движения ППТМ в зонах загрузки и выгрузки ПО. При этом в зоне загрузки и выгрузки ПО может присутствовать только одно элементарное прямолинейное или вращательное движение, используемое в роторных или роторно-конвейерных машинах. Поэтому процесс загрузки и выгрузки ПО в ППТМ, выполняемый в соответствии с предложенными техническими решениями, ведется аналогично роторной или роторно-конвейерной загрузке и выгрузке ПО. Это значительно упрощает процесс загрузки и выгрузки ПО с ППТМ и резко расширяет их технологические возможности.

Однако заметим, что при загрузке и выгрузке ПО с ППТМ по первому варианту присутствует большая неравномерность движений. Это можно проследить на примере принципиально-структурной модели ПВТМ, представленной на рисунке 4, а. Принципиальная кинематическая схема это ПВТМ состоит из двух элементарных движений a_{i1} и a_{i2} причем вращательное движение a_{i2} выполняется непрерывно, а осевое прямолинейное движение реализуется с остановками в зонах $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{v_{i2}}$. Это приводит к значительным динамическим колебаниям БТВ 1 и перемещению их по ломаной винтовой траектории 2, что в ряде случаев может ограничивать применение этого способа на практике.

По второму способу загрузки и выгрузки ПО с ППТМ обеспечивается улучшение кинематических параметров ППТМ, так как в этом случае снижаются динамические колебания за счет более равномерных параметров кинематических движений. Это связано с тем, что остановка одного или нескольких движений выполняется только в зоне загрузки или выгрузки ПО [5, 7].

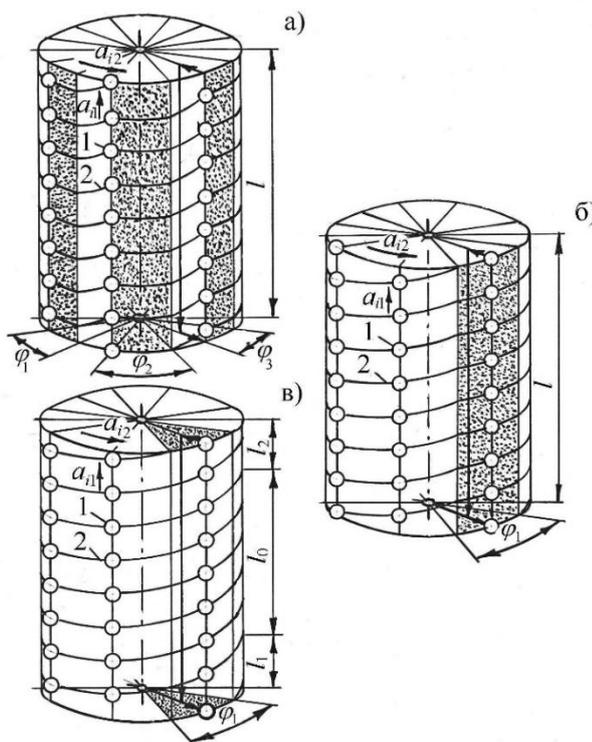


Рисунок 4. Варианты принципиально-структурных моделей ПВТМ с различными схемами кинематики осевого движения: а – с несколькими остановками за один полный оборот, б – с одной остановкой за один полный оборот, в – с нестационарным движением по границам

На рисунке 4, б представлена принципиально-структурная модель ПВТМ, в которой за один полный кинематический цикл вращательного движения a_{i2} , прямолинейное осевое движение останавливается в одной зоне φ_1 по углу поворота модуля. При этом БТВ 1 перемещается по винтовой траектории 2, более равномерной, чем на рисунке 4а. Такой способ загрузки и выгрузки используется в ППТМ для обработки зубчатых изделий.

Наиболее приемлемым с точки зрения снижения динамических колебаний ППТМ и увеличения их производительности является третий способ. Этот способ реализуется за счет нестационарности движения потоков подсистем одного или нескольких классов у зон загрузки и выгрузки ПО. На рисунке 4, в вращательное движение a_{i2} выполняется непрерывно, а движение a_{i1} стационарно только на участке l_0 , на участке l_1 оно изменяется от нуля до значения на участке l_0 , а на участке l_2 изменяется от значения которое на участке l_0 до нуля. Таким образом, в зонах загрузки и выгрузки ПО по углу φ_1 прямолинейное движение a_{i1} равно нулю. Поэтому здесь присутствует только вращение и ПО сложной конфигурации легко загружается и выгружаются транспортными роторами [7].

3. Заключение

В представленной работе разработана методика синтеза принципиально-структурных моделей, в основу которой положена операция декомпозиции объемно-пространственной структурной модели и принципиальной кинематической схемы на элементарные структуры и движения, затем объединения соответствующих элементарных структур и движений в упорядоченные пары и далее объединения этих упорядоченных пар (кортежей) в общую принципиально-структурную модель ППТМ. С помощью таких процедур можно создавать любые типы принципиально-структурных моделей ППТМ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бурчаков, Ш. А. Технология машиностроения: учебное пособие. - Москва Инфра-Инженерия, 2023. - 320 с
2. Левшин Г. Е. Основы технологии машиностроения: учебное пособие / Г. Е. Левшин. - Москва: Инфра-Инженерия, 2022. - 216 с.
3. Скворцов В. Ф. Основы технологии машиностроения: учебное пособие / – Томск: Изд-во Томского политехнического университета – 2013. – 350 с.
4. Безъязычный В. Ф. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 2013. — 568 с.: ил.
5. Михайлов А. Н. Основы синтеза поточно-пространственных технологических систем непрерывного действия. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 379 с.
6. Михайлов А. Н. Основы проектирования и автоматизации производственных процессов на базе технологий непрерывного действия. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 421 с.
7. Михайлов, А. Н. Структура маршрутов и закономерности движений изделий в поточно-пространственных технологических системах // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 1998. – № 3. – С. 64–79.

Поступила в редколлегию 20.05.2025 г.