

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Научная статья

УДК 677.054.3

EDN ZCURFK

doi 10.34216/2587-6147-2022-2-52-51-57

Александр Викторович Мещеряков¹

Светлана Юрьевна Богачева²

^{1,2}Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

¹meshcheryakov-av@rguk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1655-4027>

²bogacheva-su@rguk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2854-3213>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МАШИН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Аннотация. В данной статье рассматривается возможность использования цепных линейных моделей для исследования кинематики движения исполнительных механизмов машин с пространственной разветвленной механической системой. На примере ткацких машин показано влияние на кинематику движения звеньев их инерционных и диссипативных характеристик, движущего момента, момента, развиваемого пусковой муфтой, жесткости передаточных механизмов. При исследовании использованы цепные динамические модели с жесткими звеньями, которые соединены упругодиссипативными связями, уравнения Лагранжа второго рода.

Ключевые слова: ткацкая машина, механическая система, исполнительный механизм, звено, передаточный механизм, связь, момент инерции, жесткость, движущий момент, момент сцепления

Для цитирования: Мещеряков А. В., Богачева С. Ю. Использование линейных моделей механической системы машин для исследования работы их исполнительных механизмов // Технологии и качество. 2022. № 2(56). С. 51–57. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-2-56-51-57>.

Original article

Alexander V. Meshcheryakov¹

Svetlana Yu. Bogacheva²

^{1,2}Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

THE USE OF LINEAR MODELS OF THE MECHANICAL SYSTEM OF THE MACHINE'S TO STUDY THE OPERATION OF THEIR ACTUATORS

Abstract. This article discusses the possibility of using chain linear models to study the kinematics of the movement of actuators of machines with a spatial branched mechanical system. The example of weaving machines shows the effect on kinematics of movement of links of their inertial and dissipative characteristics, driving moment, torque developed by the starting clutch, rigidity of transmission mechanisms. During the studies, chain dynamic models with rigid links, which are connected by elastic dissipative bonds, second-order Lagrange's equations were used.

Keywords: weaving machine, mechanical system, actuator, link, transmission mechanism, coupling, moment of inertia, stiffness, driving moment, clutch moment

For citation: Meshcheryakov A. V., Bogacheva S. Yu. The use of linear models of the mechanical system of the machine's to study the operation of their actuators. Technologies & Quality. 2022. Nr 2(56). P. 51–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-2-56-51-57>.

Подвижная часть механической системы многих машин, в частности ткацких, имеет пространственную разветвленную схему с одной степенью подвижности. На примере ткацких машин рассмотрена возможность использования линейных цепных динамических моделей механических частей машин для исследования работы их исполнительных механизмов.

Исполнительные механизмы ткацких машин имеют небольшие размеры относительно габаритов машины и соединяются как последовательно, так и параллельно, с помощью валов и разных передаточных механизмов. Основу механической системы составляет главный вал, имеющий большую протяженность. У многих ткацких машин движение от него получают все исполнительные механизмы. Значительные продольные размеры имеют и другие валы, некоторые цепные и ременные передаточные механизмы ткацких машин. Исполнительные механизмы, зубчатые передаточные механизмы, отдельные детали этих машин имеют значительно меньшие продольные размеры при больших поперечных размерах. Поэтому жесткость и инерционные параметры валов и передаточных механизмов получаются на порядки меньше, чем у исполнительных механизмов. Это позволяет звенья привода, исполнительные механизмы и отдельно расположенные массивные детали подвижной части механической системы ткацких машин при изучении их движения принимать как абсолютно жесткие звенья с одной степенью подвижности, обладающие инерцион-

ными характеристиками, к которым приложены силы сопротивления движению и технологического сопротивления. Валы и передаточные механизмы, соединяющие исполнительные механизмы, можно рассматривать как безынерционные упругодиссипативные связи, распределив их инерционные параметры между абсолютно жесткими звеньями модели [1, с. 16–37]. Таким образом можно получить динамическую модель механической системы ткацкой машины, которая позволит моделировать движение входного звена интересующего исполнительного механизма. Эксперимент показывает [2, с. 109–113], что удобно сводить механическую систему к линейной цепной модели, выбрав в качестве основной линию от приводного электродвигателя до исследуемого исполнительного механизма, приведя ветви, отходящие от основной линии, известными методами к местам их ответвлений [3, с. 24–30, 40–50].

На рис. 1 приведена линейная динамическая модель ткацкой машины, разработанная на основе высказанных положений для ткацкой машины типа СТБ. Машина оснащена асинхронным двигателем, который соединен со шкивами пусковой муфты ременной передачей. Пусковая муфта и тормоз расположены на главном валу машины. Привод батанного механизма располагается в двух отдельных батанных коробках по сторонам ткани. Остальные исполнительные механизмы получают движение с левой стороны главного вала через передаточные механизмы и валы.

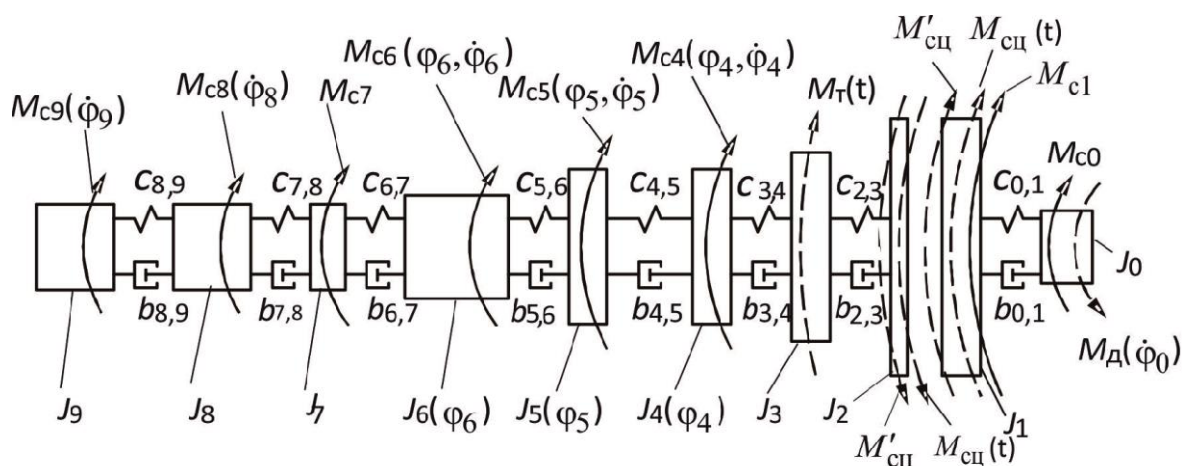


Рис. 1. Линейная цепная модель механической системы ткацкой машины (расшифровка обозначений, используемых на рисунке, дана после системы уравнений)

В звенья модели включены следующие детали и исполнительные механизмы машины:
0 – ротор электродвигателя и шкив на его валу;
1 – ременные шкивы пусковой муфты;

2 – фрикцион пусковой муфты;
3 – тормозной барабан;
4 – правая батанная коробка;
5 – левая батанная коробка;

6 – механизмы, получающие движение от конической передачи главный вал – распределительный вал;

7 – детали передаточного механизма между главным и верхним валами;

8 – механизмы, находящиеся на верхнем валу;

9 – механизмы, находящиеся на эксцентриковом валу.

Все периоды работы ткацкой машины этой модели описываются системой уравнений Лагранжа второго рода [4, с. 24–26].

$$J_0\ddot{\varphi}_0 = M_d(\dot{\varphi}_0) - M_{c0} - c_{0,1}(\varphi_0 - \varphi_1) - b_{0,1}(\dot{\varphi}_0 - \dot{\varphi}_1);$$

$$J_1\ddot{\varphi}_1 = c_{0,1}(\varphi_0 - \varphi_1) + b_{0,1}(\dot{\varphi}_0 - \dot{\varphi}_1) - M_{c1} - M_{cc}(t) - M'_{cc};$$

$$J_2\ddot{\varphi}_2 = M_{cc}(t) + M'_{cc} - c_{2,3}(\varphi_2 - \varphi_3) - b_{2,3}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3);$$

$$J_3\ddot{\varphi}_3 = c_{2,3}(\varphi_2 - \varphi_3) + b_{2,3}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - M_T(t) - c_{3,4}(\varphi_3 - \varphi_4) - b_{3,4}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4);$$

$$J_4(\varphi_4)\ddot{\varphi}_4 + \frac{1}{2} \frac{dJ_4(\varphi_4)}{d\varphi_4} \dot{\varphi}_4^2 = c_{3,4}(\varphi_3 - \varphi_4) + b_{3,4}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - M_{c4}(\varphi_4, \dot{\varphi}_4) - c_{4,5}(\varphi_4 - \varphi_5) - b_{4,5}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5);$$

$$J_5(\varphi_5)\ddot{\varphi}_5 + \frac{1}{2} \frac{dJ_5(\varphi_5)}{d\varphi_5} \dot{\varphi}_5^2 = c_{4,5}(\varphi_4 - \varphi_5) + b_{4,5}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5) - M_{c5}(\varphi_5, \dot{\varphi}_5) - c_{5,6}(\varphi_5 - \varphi_6) - b_{5,6}(\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6);$$

$$J_6(\varphi_6)\ddot{\varphi}_6 + \frac{1}{2} \frac{dJ_6(\varphi_6)}{d\varphi_6} \dot{\varphi}_6^2 = c_{5,6}(\varphi_5 - \varphi_6) + b_{5,6}(\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6) - M_{c6}(\varphi_6, \dot{\varphi}_6) - c_{6,7}(\varphi_6 - \varphi_7) - b_{6,7}(\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_7);$$

$$J_7\ddot{\varphi}_7 = c_{6,7}(\varphi_6 - \varphi_7) + b_{6,7}(\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_7) - M_{c7} - c_{7,8}(\varphi_7 - \varphi_8) - b_{7,8}(\dot{\varphi}_7 - \dot{\varphi}_8);$$

$$J_8\ddot{\varphi}_8 = c_{7,8}(\varphi_7 - \varphi_8) + b_{7,8}(\dot{\varphi}_7 - \dot{\varphi}_8) - M_{c8}(\dot{\varphi}_8) - c_{8,9}(\varphi_8 - \varphi_9) - b_{8,9}(\dot{\varphi}_8 - \dot{\varphi}_9);$$

$$J_9\ddot{\varphi}_9 = c_{8,9}(\varphi_8 - \varphi_9) + b_{8,9}(\dot{\varphi}_8 - \dot{\varphi}_9) - M_{c9}(\dot{\varphi}_9),$$

где J_0, \dots, J_9 – моменты инерции звеньев с 0 по 9;

$\ddot{\varphi}_0, \dots, \ddot{\varphi}_9$; $\dot{\varphi}_0, \dots, \dot{\varphi}_9$; $\varphi_0, \dots, \varphi_9$ – ускорения, скорости и углы поворота соответствующих звеньев;

M_{c0}, \dots, M_{c9} – моменты сопротивления движению этих звеньев;

$c_{0,1}, \dots, c_{8,9}$; $b_{0,1}, \dots, b_{8,9}$ – коэффициенты жесткости и диссипации связей между звеньями;

$M_d(\dot{\varphi}_0)$ – движущий момент;

$M_{cc}(t)$ – момент сцепления, развиваемый пусковой муфтой;

M'_{cc} – остаточный момент в пусковой муфте;

$M_T(t)$ – момент, развиваемый тормозом.

Эта система дифференциальных уравнений позволяет моделировать законы изменения кинематических характеристик движения звеньев и динамические характеристики, возникающие в связях, в различные периоды работы ткацкой машины. Движение модели разбито на четыре периода: разгон ротора электродвигателя, шкива на его валу и ременных шкивов пусковой муфты до скорости холостого хода $\dot{\varphi}_{х.х.}$; от включения пусковой муфты до выравнивания скоростей ее ременных шкивов и фрикциона $\dot{\varphi}_{cc}$ (скорость сцепления); установившийся режим работы машины; останов машины.

Анализ конструкций ткацких машин позволил принять следующие законы изменения механических параметров звеньев модели [2, с. 124–219]:

$$J_{0,1,2,3,7,8,9} - \text{const},$$

$$J_{4,5,6} = \frac{\bar{J}_i}{2} + \sum_q^{q_{\max}} [a_i \cos q_i \varphi_i + b_i \cos q_i \varphi_i];$$

$$M_{c0} - \text{const},$$

$$M_{c1,2,3} = 0,$$

$$M_{c7,8,9} = \bar{M}_{ci} + f_i \varphi_i,$$

$$M_{c4,5,6} = \bar{M}_{ci} + f_i \varphi_i + \sum_q^{q_{\max}} [a_{ci} \cos q_{ci} \varphi_i + b_{ci} \cos q_{ci} \varphi_i],$$

$$M_d = 2M_k (1 + a_d S_k) \left[\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S + 2a_d S_k} \right]^{-1};$$

$$M_{cc} = M_{cc,n} [\alpha + \sin(\gamma t + \beta)], \quad M'_{cc} - \text{const},$$

$$M_T = M_{T,n} \left[(1 - y^{-kt})h + \left(\frac{1}{d} - 1 \right) e^{-nt} \beta \sin mt - \gamma t \right],$$

где \bar{J}_i – средний момент инерции звена;

\bar{M}_{ci} – средний момент сопротивления движению звена;

M_k – критический момент двигателя;

S – скольжение;

S_k – критическое скольжение;

$M_{сц.н}$ – номинальный момент, развиваемый пусковой муфтой;

$M_{т.н}$ – номинальный момент, развиваемый тормозом.

В результате решения приведенной системы уравнений получают графики зависимостей во времени следующих параметров: углов поворота, угловых скоростей и ускорений звеньев модели, их моментов инерции и моментов сопротивления движению; моментов в связях; момента на валу двигателя; момента, развиваемого пусковой муфтой; момента, развиваемого тормозом машины.

На рис. 2 в качестве примера показаны графики изменения скоростей звеньев модели в функции времени. При включении двигателя

ротор и приводные шкивы (ведущая часть модели, кривые 0 и 1) плавно разгоняются до скорости холостого хода $\dot{\phi}_{х.х.}$.

После включения пусковой муфты к звеньям 1 и 2 прикладывается момент $M_{сц.}$. Через некоторое время начинают последовательно двигаться другие звенья модели (ведомая часть модели, кривые 2–9). До выравнивания скоростей звеньев 1 и 2 (скорость $\dot{\phi}_{сц.}$ на рис. 2) движение всех звеньев происходит плавно без заметных колебаний. После выравнивания скоростей все звенья движутся со значительными колебаниями, которые увеличиваются до момента выхода машины на режим установившегося движения. Анализ полученных результатов показывает, что колебания совершаются относительно звеньев 1, 2, 3, которые обладают наибольшими моментами инерции и конструктивно выполнены как единый блок. Наибольшее колебание скорости наблюдается у звена 9 модели.

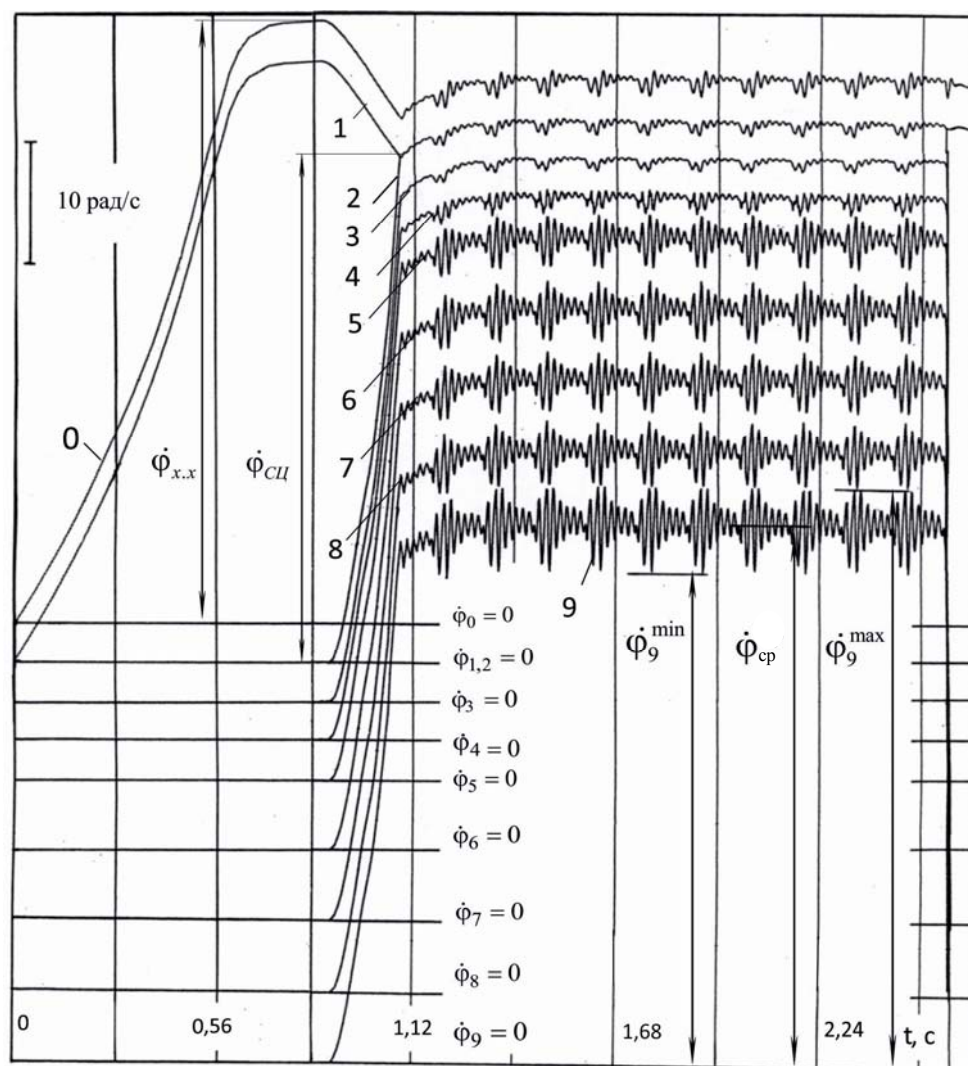


Рис. 2. Графики изменения скоростей звеньев модели в процессе работы

Аналогичная картина наблюдается по ускорениям звеньев модели. Углы поворота изменяются в процессе работы модели без существенных колебаний. Сравнение результатов расчетов с выполненными ранее экспериментальными исследованиями движения звеньев ткацких машин в разные периоды работы [3, с. 246–250] показало их хорошее совпадение.

В ходе обработки результатов вычислительного эксперимента было изучено влияние на скоростные характеристики движения звеньев модели движущего момента, развиваемого двигателем, момента сцепления, развиваемого пусковой муфтой, инерционных и диссипативных характеристик ее звеньев.

На рис. 3 представлена диаграмма скоростных характеристик движения звеньев модели при использовании двигателя разной мощности.

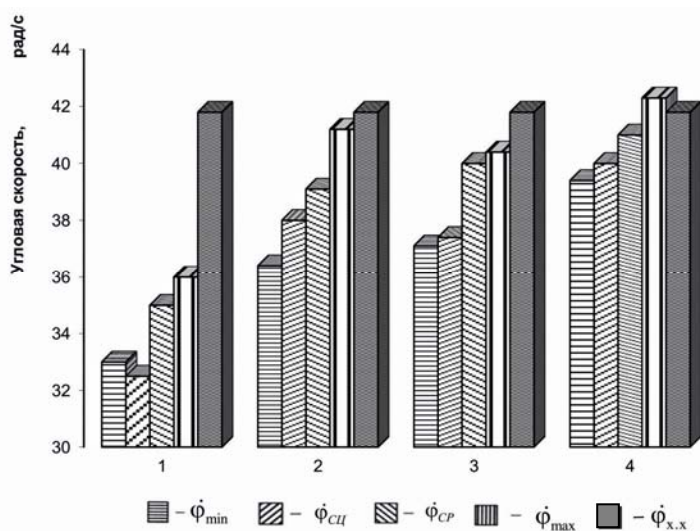


Рис. 3. Диаграмма скоростных характеристик:

1–4 – группы двигателей; $\dot{\varphi}_{\min}$ – минимальная; $\dot{\varphi}_{\text{ср}}$ – средняя; $\dot{\varphi}_{\max}$ – максимальная скорость звена; $\dot{\varphi}_{\text{сц}}$ – скорость сцепления; $\dot{\varphi}_{\text{х.х}}$ – скорость холостого хода

На рис. 4 приведены графики влияния скоростного режима модели на неравномерность движения ее звеньев. При всех двигателях увеличение скоростного режима ведет к увеличению неравномерности движения звеньев модели. При более мощных двигателях это проявляется сильнее.

Изменение момента сцепления $M_{\text{сц}}$, развиваемого пусковой муфтой привода, влияет только на скорость $\dot{\varphi}_{\text{сц}}$. Так, при двигателе $N = 4,0$ кВт и средней скорости $\dot{\varphi}_{\text{ср}} = 44,8$ рад/с увеличение момента сцепления с 150 до 200 Н·м ведет к увеличению $\dot{\varphi}_{\text{сц}}$ на 1,7 рад/с; с 200 до 250 Н·м на 1,08 рад/с; с 250 до 300 Н·м на 0,75 рад/с; с 300 до 350 Н·м на 0,42 рад/с; с 350 до 400 Н·м на 0,28 рад/с.

Расчетная скорость модели была принята равной 40,1 рад/с. На диаграмме скоростные параметры модели, рассчитанные с одним двигателем, объединены в самостоятельные группы и обозначены 1, 2, 3, 4. Исследования проведены для четырех асинхронных двигателей серии 4А с синхронной частотой 1500 мин⁻¹ и мощностью двигателя: 1-я группа – 2,2 кВт; 2-я группа – 3,0 кВт; 3-я группа – 4,0 кВт; 4-я группа – 5,0 кВт. Увеличение мощности двигателя не влияет на скорость $\dot{\varphi}_{\text{х.х}}$. Другие скоростные характеристики звеньев модели с ростом мощности двигателя увеличиваются. Это связано с тем, что при использовании двигателя большей мощности работа происходит на более крутой части его механической характеристики. Более существенно при увеличении мощности двигателя изменяются скоростные параметры дальних звеньев.

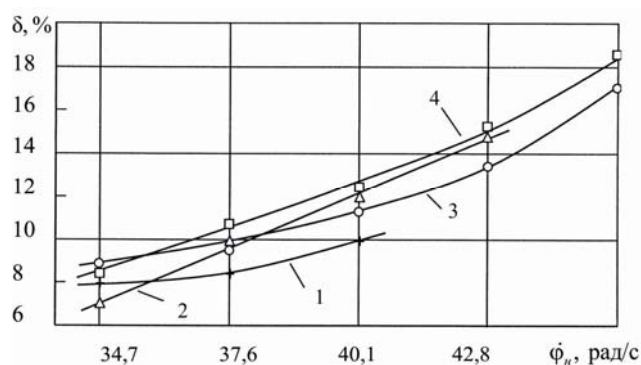


Рис. 4. Влияние скоростного режима модели на неравномерность движения

Влияние величины момента инерции звеньев модели на неравномерность их движе-

ния (δ , %) показано в табл. 1. Моменты инерции звеньев 3 и 7 в ходе эксперимента оставались неизменными.

Влияние коэффициентов жесткости связей между звеньями модели на неравномерность движения ее звеньев показано в табл. 2. Коэффициенты жесткости связей между звеньями 6–7 и 7–8 в ходе вычислительного эксперимента оставались постоянными.

Анализ результатов исследований показывает, что увеличение коэффициента жесткости связи 0, 1 (между ротором двигателя и ременными шкивами пусковой муфты) ведет к увеличению неравномерности движения всех звеньев модели. Увеличение коэффициентов жесткости других связей ведет к уменьшению неравномерности движения звеньев модели.

Многие механизмы ткацких машин работают в масляных ваннах, и их моменты сопротивления зависят от скорости движения.

В представленной модели это относится к звеньям 4, 5, 6, 8, 9. Были проведены исследования влияния коэффициента изменения момента сопротивления движению от скорости на кинематические характеристики движения модели. Этот коэффициент был принят одинаковым у моментов сопротивления всех пяти звеньев. Увеличение данного параметра ведет к уменьшению всех кинематических характеристик движения звеньев модели, кроме скорости холостого хода $\dot{\varphi}_{х.х.}$.

Проведенные исследования показывают, что для исследования работы исполнительных механизмов машины с разветвленной механической системой можно использовать линейные цепные модели, составив линейную цепь от двигателя до интересующего исполнительного механизма. Это существенно упрощает проведение исследований.

Таблица 1

Момент инерции, кг·м ²	Звено									
	0	1+2	3	4	5	6	7	8	9	
	δ , %									
J_0	0,35	4,9	3,2	2,7	4,5	10,9	12,3	12,3	13,2	17,6
	0,38	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	12,2	12,3	12,9	17,1
	0,42	4,5	3,0	2,7	4,2	10,3	12,0	12,3	12,5	16,7
J_{1+2}	1,0	4,7	2,9	2,9	4,1	9,8	10,4	10,6	11,7	15,3
	1,3	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	11,9	12,0	13,0	17,1
	1,5	4,7	3,3	2,5	4,7	11,3	13,2	13,4	14,3	18,7
J_4	0,040	4,8	3,0	2,6	4,2	10,4	12,1	12,1	12,4	16,7
	0,049	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	12,2	12,3	12,9	17,1
	0,052	4,6	3,2	2,8	4,6	10,8	12,5	12,4	13,0	17,4
J_5	0,040	4,7	3,1	2,7	4,8	10,8	11,9	12,5	12,9	16,7
	0,049	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	12,2	12,3	12,9	17,1
	0,052	4,7	3,1	2,7	4,1	10,5	12,5	12,2	12,9	17,6
J_6	0,015	4,7	3,1	2,7	4,3	10,7	12,1	11,4	12,9	16,9
	0,021	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	12,2	12,3	12,9	17,1
	0,030	4,7	3,1	2,7	4,6	10,5	12,6	13,2	12,9	17,4
J_8	0,006	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	12,3	12,4	12,7	16,7
	0,009	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	12,2	12,3	12,9	17,1
	0,140	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	12,0	12,1	13,2	17,6
J_9	0,002	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	12,2	12,3	13,0	16,7
	0,0022	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	12,2	12,3	12,9	17,1
	0,0024	4,7	3,1	2,7	4,4	10,6	12,2	12,3	12,8	17,5

Таблица 2

Коэффициент жесткости связи, Н·м/рад	$c_{0,1}$			$c_{2,3}$			$c_{3,4}$		
	$20 \cdot 10^3$	$28 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^4$	$34 \cdot 10^4$	$40 \cdot 10^4$	$60 \cdot 10^3$	$67 \cdot 10^3$	$80 \cdot 10^3$
δ , %	16,2	17,1	18,5	17,5	17,1	16,4	18,2	17,1	14,8
Коэффициент жесткости связи, Н·м/рад	$c_{4,5}$			$c_{5,6}$			$c_{8,9}$		
	$30 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$41 \cdot 10^3$	$16 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^4$	$26 \cdot 10^4$	$7,8 \cdot 10^3$	$8,4 \cdot 10^3$	$9,3 \cdot 10^3$
δ , %	17,9	17,1	16,5	17,6	17,1	16,3	17,1	17,1	17,1

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маслов Г. С. Расчеты колебаний валов : справочник. М. : Машиностроение, 1980. 151 с.
2. Мартынов И. А., Мещеряков А. В., Корнев Б. И. Динамика приводов ткацких машин. М. : МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2002. 352 с.
3. Ривин Е. В. Динамика привода станков. М. : Машиностроение, 1966. 204 с.
4. Динамика машин и управление машинами : справочник / В. К. Астахин, В. И. Бабицкий, И. И. Вульсон [и др.] ; под ред. Г. В. Крейнина. М. : Машиностроение, 1988. 240 с.

REFERENCES

1. Maslov G. S. Calculations of Shaft Oscillations*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 151 p. (In Russ.)
2. Martynov I. A., Meshcheryakov A. V., Kornev B. I. Dynamics of drives of weaving machines*. Moscow, Kosygin Rus. St. Univ. Publ., 2002. 352 p. (In Russ.)
3. Rivin E. V. Dynamics of Machine Drives*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 204 p. (In Russ.)
4. Astashin V. K., Babitsky V. I., Vulson I. I. [et. al.]; G. V. Kreinin (ed.) Dynamics of machines and control of machines*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 240 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 11.04.2022
Принята к публикации 19.05.2022

*Перевод названия источника выполнен авторами статьи / Translated by author's of the article.