

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОЛОТНА В ПРОЦЕССЕ ОТБЕЛИВАНИЯ ТКАНИ

В.А. Зайцев, Б.А. Головушкин, П.Н. Грименицкий, Е.В. Ерофеева

Виктор Александрович Зайцев, Борис Анатольевич Головушкин *, Павел Николаевич Грименицкий, Елена Владимировна Ерофеева

Кафедра технической кибернетики и автоматики, Ивановский химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: zaytsev_va@isuct.ru, golovushkinb@mail.ru *, grim@isuct.ru, erofeevaigxty@mail.ru

Работа рассматривает вопросы разработки математической модели электромеханического процесса намотки – размотки полотна. Примером служит технологический процесс отбеливания ткани. Процедура намотки – размотки проводится с применением механизмов, приводимых в движение электродвигателями. Электромеханические процессы подобного рода широко распространены в промышленности и потребляют большое количество электроэнергии, влияя на экологию. Эффективное управление такого рода процессами позволяет снизить потребление электроэнергии и повысить качество производимой продукции. Основная сложность управления такими процессами – необходимость синхронизации работы двух и более двигателей. Для создания системы управления требуется, во-первых, исследовать процесс намотки – размотки полотна. Одним из методов исследования является имитационное моделирование. Для проведения процедуры численного эксперимента создается математическая модель. В статье описана процедура математического моделирования процессов движения валов с полотном ткани и их взаимодействие. Рассмотрены локальные системы управления асинхронными электродвигателями и системы передачи моментов вращения. Математические модели отдельных подсистем сведены в общую систему уравнений в пространстве состояний. Полученная система уравнений позволяет рассматривать процесс в целом. Кроме этого, математическая модель в пространстве состояний позволяет использовать современные методы синтеза законов управления. Также этот вид математического описания легко интерпретировать в виде блок-диаграмм визуальных языков программирования систем компьютерной математики. Язык функциональных блок-диаграмм входит в набор языков стандарта международной электротехнической комиссии всемирной торговой организации и используется для программирования современных контроллеров. Следующий этап исследования – создание имитационной модели и проведение численных экспериментов. Эти эксперименты позволят провести структурный синтез системы управления.

Ключевые слова: математическая модель, имитационная модель, система управления, численный эксперимент

THE MATHEMATICAL SIMULATION OF THE CLOTH MOVEMENT SYSTEM IN THE PROCESS OF FABRIC BLEACHING

V.A. Zaitsev, B.A. Golovushkin, P.N. Grimenitsky, E.V. Erofeeva

Viktor A. Zaitsev, Boris A. Golovushkin *, Pavel N. Grimenitsky, Elena V. Erofeeva

Department of Technical Cybernetics and Automation, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: zaytsev_va@isuct.ru, golovushkinb@mail.ru *, grim@isuct.ru, erofeevaigxty@mail.ru

The paper considers the issues of developing a mathematical model of the electromechanical process of winding - unwinding in a lot. An example is the technological process of fabric bleaching. The winding - unwinding procedure is carried out using mechanisms driven by electric motors. Electro-mechanical processes of this kind are widespread in industry and consume a large amount of electrical energy, affecting the environment. Effective management of such processes makes it possible to reduce electricity consumption and improve the quality of products. The main difficulty of managing such processes is the need to synchronize the operation of two or more engines. To create a control system, it is required, firstly, to investigate the process of winding – unwinding of the web. One of the research methods is simulation modeling. A mathematical model is created to carry out the numerical experiment procedure. The article describes the procedure of mathematical modeling of the processes of movement of shafts with a cloth tray and their interaction. Local control systems of asynchronous electric motors and torque transmission systems are considered. Mathematical models of individual subsystems are combined into a general system of equations in the state space. The resulting system of equations allows us to consider the process as a whole. In addition, the mathematical model in the space of states allows the use of modern methods of synthesis of control laws. It is also easy to interpret this type of mathematical description in the form of block diagrams of visual programming languages of computer mathematics systems. The language of functional block diagrams is included in the set of languages of the standard of the International Electrotechnical Commission of the World Trade Organization and is used for programming of modern controllers. The next stage of the research is to create a simulation model and conduct numerical experiments. These experiments will allow the structural synthesis of the control system.

Key words: mathematical model, simulation model, control system, numerical experiment

Для цитирования:

Зайцев В.А., Головушкин Б.А., Грименицкий П.Н., Ерофеева Е.В. Математическое моделирование работы системы перемещения полотна в процессе отбеливания ткани. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 12. С. 91–97

For citation:

Zaitsev V.A., Golovushkin B.A., Grimenitsky P.N., Erofeeva E.V. The mathematical simulation of the cloth movement system in the process of fabric bleaching. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. V. 64. N 12. P. 91–97

ВВЕДЕНИЕ

Химический процесс отбеливания полотна является одной из важных стадий текстильного производства [1, 2]. Процесс в целом можно разделить на две части: физико-химические процессы, протекающие в ванне отбеливания, и электромеханические процессы перемещения полотна ткани [3].

В статье ставится задача исследования электромеханического процесса намотки – размотки полотна в ротационной рулонной установке отбеливания, как фактора наибольшего влияния на качество продукта. Такого рода процессы широко распространены в текстильной [4], целлюлозно-бумажной, металлургической [5] и других видах промышленности [6].

По данным Control Engineering (Россия), одного из крупнейших в России издания в области промышленной автоматизации, «70% всей электрической мощности в промышленности используется

миллионами электрических двигателей, 75% из которых управляют центробежными механизмами» [7].

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Применение современных устройств управления электроприводом, например, частотных преобразователей, позволяет снизить потребление энергии на 40% [7]. Еще большую экономию позволяют создать эффективные алгоритмы управления [8], для разработки которых необходимо исследовать технологический процесс как объект управления [9]. Для решения этой задачи предлагается создать математическую модель процесса.

Схематично установка для отбеливания ткани – джиггер представлена на рис. 1.

В ходе процесса необходимо несколько раз пропустить полотно через отбеливающий раствор, попеременно наматывая его на первый или второй вал и, соответственно, сматывая с другого [10].

Для выполнения требований, предъявляемых к качеству проведения процесса [11], необходимо контролировать линейную скорость движения полотна и силу его натяжения. В качестве управляющих величин могут выступать частоты и моменты вращения валов, которые непосредственно связаны со скоростями и моментами вращения роторов соответствующих электродвигателей [12].

Для решения задачи анализа представленной системы целесообразно подвергнуть ее декомпозиции [9], разделив на несколько подсистем.

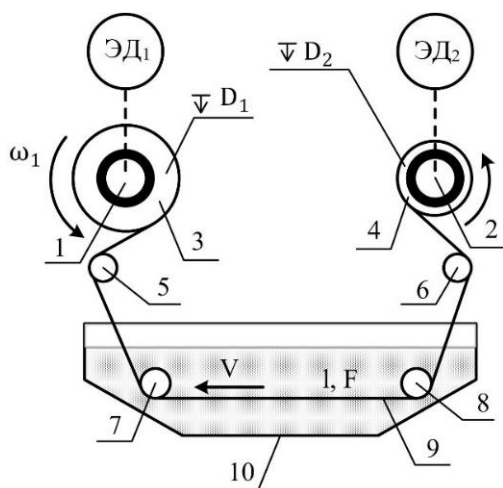


Рис. 1. Принципиальная схема установки отбеливания ткани. Где: ЭД1, ЭД2 - трехфазные асинхронные электрические двигатели; 1, 2 - валы; 3, 4 - слой намотанного полотна; 5, 6, 7, 8 - направляющие ролики; 9 - полотно ткани; 10 - ванна с отбеливающим раствором; l - длина полотна между валами, м; F - сила натяжения ткани между валами, Н; V - линейная скорость движения ткани м/с; ω_1, ω_2 - частота вращения валов, Гц; D_i - толщина слоя намотанного на вал полотна, м

Fig. 1. Schematic diagram of the fabric bleaching unit. Where: ЭД1, ЭД2 - three-phase asynchronous electric motors; 1, 2 - shafts; 3, 4 - a layer of wound cloth; 5, 6, 7, 8 - guide rollers; 9 - fabric cloth; 10 - a bath with bleaching solution; l - the length of the cloth between the shafts, m; F - the tension force of the fabric between the shafts, N; V - the linear velocity of the movement of the fabric, m/s; ω_1, ω_2 - shaft rotation frequency, Hz; D_i is the thickness of the layer of the web wound on the shaft, m

МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ «ВАЛ С НАМОТАННЫМ ПОЛОТНОМ»

Вал с намотанным на него материалом и распределенной в нем влагой при ее равномерном распределении можно представить в виде трех полых цилиндров.

Момент инерции полого цилиндра J_y (Н·м²) при равномерном распределении плотности и оси вращения, совпадающей с его осью [13]:

$$J_y = \frac{1}{2} mg(R_{in}^2 - R_{en}^2)$$

где: m - масса цилиндра, кг; R_{in}, R_{en} - наружный и внутренние его радиусы, м; g - ускорение свободного падения, м/с².

Тогда суммарный момент инерции на i -том валу J_i^g сложится из моментов инерции самого вала J_i^g , ткани J_i^{mk} и жидкости J_i^{gl}

$$J_i^g = J_i^g + J_i^{mk} + J_i^{gl}$$

В свою очередь при наматывании полотна на вал:

$$J_i^g = \frac{1}{2} m_i^g g (R_{in}^{g2} - R_{en}^{g2})$$

$$J_i^{mk} = \frac{1}{2} ((D_i + R_{in}^g)^2 - R_{in}^{g2}) g W_i^{mk}$$

$$J_i^{gl} = \frac{1}{2} ((D_i + R_{in}^g)^2 - R_{in}^{g2}) g W_i^{gl}$$

где: R_{in}^g - наружный радиус вала, R_{en}^g - внутренний радиус вала, м; m_i^g - масса вала, кг;

$$\rho_{mk} H h \left(l_i^H + \int_0^\tau V d\tau \right) =$$

$$= \rho_{mk} H h \left(l_i^H + 2\pi \int_0^\tau \omega_i (R_{in}^g + D_i) d\tau \right) = W_i^{mk}$$

- текущий вес намотанной ткани с учетом известной связи между угловой и линейной скоростью, кг;

$$\rho_{gl} H w_i h \left(l_i^H + \int_0^\tau V d\tau \right) =$$

$$= \rho_{gl} H w_i h \left(l_i^H + 2\pi \int_0^\tau \omega_i (R_{in}^g + D_i) d\tau \right) = W_i^{gl}$$

- текущий вес влаги в намотанной ткани, кг;

$D_i^H + h \int_0^\tau w_i d\tau = D_i$ - текущая толщина слоя намотанной ткани, D_i^H - начальная толщина слоя намотанной ткани, l_i^H - начальная длина намотанного на вал полотна

ρ_{mk} - плотность сухой ткани, ρ_{gl} - плотность отбеливающего раствора, кг/м³; h - толщина полотна, м; w_i - влагосодержание, в объемных долях.

Соответственно при разматывании полотна с вала изменяются пределы интегрирования:

$$\rho_{mk} H h \left(l_i^H + 2\pi \int_0^\tau \omega_i (R_{in}^g + D_i) d\tau \right) = W_i^{mk},$$

$$\rho_{gl} H w_i h \left(l_i^H + 2\pi \int_0^\tau \omega_i (R_{in}^g + D_i) d\tau \right) = W_i^{gl},$$

$$D_i^H + h \int_0^\tau w_i d\tau = D_i$$

А в виде уравнений пространства состояний [14]:

$$\begin{cases} \frac{dW_i^{mk}}{d\tau} = \rho_{mk} H h 2\pi \omega_i (R_{in}^6 + d_i) \\ \frac{dW_i^{6l}}{d\tau} = \rho_{6l} H 2\pi \omega_i (R_{in}^6 + d_i) \\ \frac{dD_i}{d\tau} = h \omega_i \end{cases}$$

С начальными условиями

$$W_i^{mk}(0) = \rho_{mk} H h l_i^H, \quad W_i^{6l}(0) = \rho_{6l} H w_i h l_i^H, \\ D_i(0) = D_i^H \quad (1)$$

В некоторых случаях, например, в случае аварийного останова технологического процесса, с течением времени масса влаги будет перемещаться вниз, по профилю вала с тканью, обеспечивая неравномерность влагосодержания [15] (рис. 2).

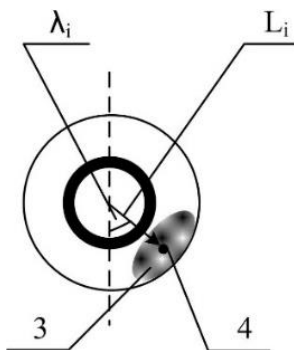


Рис. 2. Неравномерное распределение влаги в профиле рулона полотна. Где: 3 – сконцентрированная влага, 4 – ее центр масс, L_i – расстояние между центром масс влаги и центром вращения; λ_i – угол (град.) между вертикальной осью и отрезком, проведенным от центра вращения к центру масс; пунктиром обозначена вертикальная ось

Fig. 2. Uneven distribution of moisture in the profile of the web roll. Where: 3 - concentrated moisture, 4 - its center of mass, L_i - the distance between the center of mass of moisture and the center of rotation; λ_i - the angle (deg.) between the vertical axis and the segment drawn from the center of rotation to the center of mass; the dotted line indicates the vertical axis

В этом случае предлагается рассчитывать момент инерции влаги как момент инерции маятника, а так как подвес в данном случае отсутствует, то маятник можно считать математическим, а не физическим. Тогда момент инерции центра масс в процессе наматывания полотна можно записать [13, 16]:

$$J_i^{6l} = g L_i^2 W_i^{6l}.$$

На центр масс будет действовать также вращающий момент, созданный силой тяжести:

$$M_i^{6l} = L_i W_i^{6l} g \sin \lambda_i = L_i g (\sin \lambda_i) W_i^{6l}.$$

В процессе разматывания, как сказано выше, изменятся пределы интегрирования для расчета W_i^{6l} .

МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ УСИЛИЯ ОТ ДВИГАТЕЛЯ К ВАЛУ

В качестве подсистемы передачи усилия рассматривается двухступенчатый (для сохранения направления вращения) цилиндрический редуктор [17, 18]. По сравнению с предыдущей подсистемой редуктор обладает малой инерционностью и может быть описан уравнениями статики. Выражение для крутящего момента на его выходе запишется:

$$M_{i\text{вых}}^p = \frac{P_{i\text{вх}}^p n_i^p \mu_i^p}{100 \omega_{i\text{вх}}^p} \quad (2)$$

где: $M_{i\text{вых}}^p$ – вращающий момент на выходе i -того редуктора, Н·м; $P_{i\text{вх}}^p$ – мощность на его входе, Вт; μ_i^p – КПД редуктора, %; n_i^p – передаточное число; $\omega_{i\text{вх}}^p$ – частота вращения входного зубчатого колеса редуктора, Гц.

Примем допущения:

- зазоры в механической передаче редуктора и зазоры в соединительных муфтах не учитываются;
- жесткость механических соединений вала электродвигателя с колесом редуктора, выходного колеса редуктора и вала с полотном стремится к бесконечности.

Тогда $\omega_{i\text{вх}}^p$ равна частоте вращения ротора двигателя, а $\omega_{i\text{вых}}^p$ – частота вращения выходного колеса редуктора равна частоте вращения вала с тканью ω_i .

Мощность на входе редуктора рассчитывается [19]: $P_{i\text{вх}}^p = M_{i\text{вх}}^p \omega_{i\text{вх}}^p$, где $M_{i\text{вх}}^p$ – вращающий момент входного колеса редуктора. Подставляя последнее выражение в (2), получим окончательное выражение для вращающего момента на выходе первого редуктора:

$$M_{i\text{вых}}^p = \frac{M_{i\text{вх}}^p n_i^p \mu_i^p}{100}$$

Если же учитывать динамику элементов редуктора [19], то его момент инерции можно описать суммой моментов инерции трех дисков (для двухступенчатого) и $n+1$ для n – ступенчатого редуктора, при допущении вращения колес редуктора в одной плоскости. В нашем случае:

$$J_i^p = J_i^{p1} + J_i^{p2} + J_i^{p3} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 g m_i^{pj} R_i^{pj}$$

где m_i^{pj} и R_i^{pj} – масса и радиус j -того колеса (вала) i -того редуктора, которые также, как и передаточное число определяются по паспорту механизма.

Изменение частоты вращения учитывается соотношением:

$$\omega_{i\text{облх}}^p = n_i^p \omega_{i\text{вх}}^p \quad (3)$$

где n_i^p – передаточное число редуктора и указывается в паспорте.

МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ «ПОЛОТНО МЕЖДУ ВАЛАМИ»

Если пренебречь силой тяжести, действующей на участок полотна между валами, то на него действует только сила упругости или сила натяжения полотна [19, 20], которая при малых растяжениях, согласно закону Гука [21], составит:

$$F = \kappa(\Delta l + \Delta l_H)$$

где: κ – коэффициент упругости, Н/м; Δl_H – начальное приращение длины полотна за счет растяжения, м; $\int_0^t 2\pi((R_{1н}^e + D_1)\omega_1 - (R_{2н}^e + D_2)\omega_2)dt = \Delta l$ – теку-

щее изменение длины условно растянутого полотна за счет разницы частот вращения валов. Эта сила будет действовать только при наличии растяжения и при сохранении целостности полотна, то есть существуют ограничения:

$$F = 0 \text{ при } (\Delta l + \Delta l_H) \leq 0 \text{ и при } F \geq F_p \quad (4)$$

где F_p – значение разрывной нагрузки для полотна конкретного типа, Н.

Уравнение же состояния для силы натяжения полотна в форме Коши запишется:

$$\frac{dF}{d\tau} = \kappa 2\pi((R_{1н}^e + D_1)\omega_1 - (R_{2н}^e + D_2)\omega_2)$$

$$\text{С начальным условием: } F(0) = \kappa \Delta l_H. \quad (5)$$

Сила упругости придаст валам дополнительные моменты вращения:

$$M_i^y = F(R_{ин}^e + D_i)$$

Эти моменты в зависимости от направления вращения будут либо противодействовать, либо содействовать ему. При выполнении условия (3) моменты станут равны нулю, что добавляет нелинейный элемент в систему [22].

МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

В настоящее время в качестве электропривода подобного рода объектов в большинстве случаев применяются асинхронные электродвигатели с векторными преобразователями частоты в качестве управляющих устройств [23, 24].

Объект управления интегрирован в систему управления, поэтому эта подсистема должна быть рассмотрена в целом [25]. Динамические процессы в электрической части рассматриваемой электро-механической системы протекают со скоростями несравнимо более высокими, чем в ее механической части. Поэтому, предлагается использовать упрощенную модель векторной системы управления скоростью вращения ротора асинхронного электродвигателя (рис. 3), при условии постоянства потокосцепления ротора [26]:

Стоит отметить, что модуль вектора потокосцепления ротора может служить дополнительной управляющей величиной, влияющей на электромагнитный момент и соответственно на частоту вращения ротора.

Предположим, что в частотном преобразователе применен ПИ – закон регулирования [27], тогда:

$$\omega_i^p = P e_i + I \int_0^t e_i d\tau$$

или в форме Коши $\frac{d\omega_i^{mp}}{d\tau} = P \frac{de_i}{d\tau} + I e_i$.

Где P и I параметры настройки пропорциональной и интегральной составляющих закона регулирования.

Учитывая, что $e_i = \omega_{i3}^p - \omega_i^p$, а ω_{i3}^p в системе нижнего уровня можно считать постоянной и зависимость (3), уравнение регулятора запишется:

$$\frac{d\omega_i^{mp}}{d\tau} = -\frac{1}{n_i^p} P \frac{d\omega_i}{d\tau} + I \left(\omega_{i3}^p - \frac{1}{n_i^p} \omega_i \right)$$

Моменты инерции величины скалярные, поэтому: $J_i = J_i^p + J_i^e + J_i^d$

Моменты инерции направляющих роликов считаем пренебрежительно малыми, в обратном же случае приводим их к моменту инерции вала.

При допущении, что вращение тел происходит в одной плоскости, что близко к действительности, а оси вращения параллельны, результирующий вращающий момент является алгебраической суммой всех действующих в системе вращающихся моментов [13]: $M_i = M_i^{эм} - M_i^c + M_i^y + M_i^{gn}$.

Угловое ускорение ротора двигателя, как производная от угловой скорости, выразится:

$$\alpha_i^p = \frac{d\omega_i^p}{d\tau} = \frac{M_i}{J_i}, \text{ а при подстановке в (3) по-}$$

лучим: $\frac{d\omega_i^p}{d\tau} = n_i^p \frac{M_i}{J_i}$

Производная же угла поворота вала с тангеном выразится $\frac{d\lambda_i}{d\tau} = 360\omega_i$, при измерении угла в градусах.

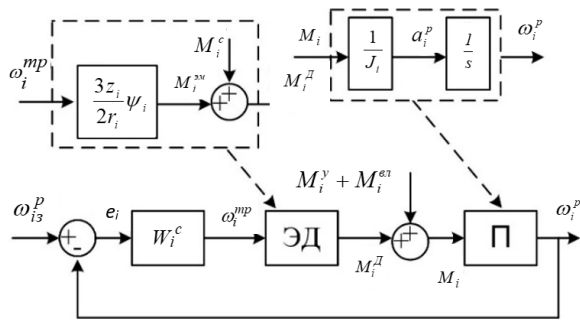


Рис. 3. Эквивалентная структурная схема системы управления скоростью вращения ротора электродвигателя. На рисунке: ЭД – двигатель, П – преобразователь, ω_{i3}^p – заданная частота вращения ротора, e_i – ошибка управления, W_i^c – передаточная функция регулятора скорости, ω_i^{mp} – частота вращения токов ротора, z_i – число пар полюсов двигателя, r_i – активное сопротивление обмоток ротора (Ом), ψ_i – модуль вектора потокосцепления ротора (Вб), $M_i^{эм}$ – электромагнитный момент двигателя, $M_i^с$ – суммарный момент сопротивления (двигателя и приведенных к нему моментов сопротивления редуктора и вала с полотном), $M_i^д$ – динамический момент вращения двигателя, M_i – суммарный динамический момент вращения ротора; J_i – суммарный момент инерции двигателя ($J_i^д$), редуктора, вала и влажного полотна на нем; α_i^p – угловое ускорение вращения ротора (Гц/с), s – комплексная переменная ($\frac{1}{s}$ – идеальное интегрирующее звено), ω_i^p – частота вращения ротора электродвигателя

Fig. 3. Equivalent block diagram of the motor rotor speed control system. In the figure: ЭД – motor, П – converter, ω_{i3}^p – the specified frequency of rotation of the rotor, e_i – control error, W_i^c – the transfer function of the speed regulator, ω_i^{mp} – the frequency of rotation of the rotor currents, z_i – the number of pairs of motor fields, r_i – the active resistance of the rotor windings (Ohm), ψ_i – the module of the rotor flow coupling vector (Wb), $M_i^{эм}$ – the electromagnetic torque of the motor, $M_i^с$ – the total moment of resistance (of the motor and the moments of resistance of the gearbox and the shaft with the web brought to it), $M_i^д$ – the dynamic torque of the motor, M_i is the total dynamic torque of the rotor; J_i – the total moment of inertia of the motor ($J_i^д$), gearbox, shaft and wet cloth on it; α_i^p – angular acceleration of rotation of the rotor (Hz/s), s – a complex variable ($\frac{1}{s}$ – an ideal integrating link), ω_i^p – the speed of rotation of the rotor of the electric motor

ОБЩАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Так как все моменты приведены к валу двигателя, то последняя подсистема позволит провести композицию – построить систему уравнений, описывающую процесс в целом.

В итоге получим следующую систему уравнений в пространстве состояний, описывающую технологический объект:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_i}{d\tau} = n_i^p \frac{M_i}{J_i} = \\ = n_i^p \frac{M_i^{эм} - M_i^с + M_i^y + M_i^{эм}}{J_i^p + J_i^B + J_i^L} \\ \frac{dW_i^{TK}}{d\tau} = \rho_{TK} Hh2\pi\omega_i (R_{in}^B + d_i) \\ \frac{dW_i^{BL}}{d\tau} = \rho_{BL} Hw_i h2\pi\omega_i (R_{in}^B + d_i) \\ \frac{dd_i}{d\tau} = h\omega_i \\ \frac{d\lambda_i}{d\tau} = 360\omega_i \\ \frac{d\omega_i^{mp}}{d\tau} = \frac{1}{n_i^p} P \frac{d\omega_i}{d\tau} + I \left(\omega_{i3}^p - \frac{1}{n_i^p} \omega_i \right) \\ \frac{dF}{d\tau} = \kappa 2\pi ((R_{in}^e + d_1)\omega_1 - (R_{2n}^e + d_2)\omega_2) \end{cases}$$

Начальные условия нулевые, кроме сформулированных выше (1) и (5).

ВЫВОДЫ

Полученная математическая модель в пространстве состояний позволяет использовать современные методы синтеза законов управления. Также этот вид математического описания легко интерпретировать в виде блок-диаграмм визуальных языков программирования систем компьютерной математики. Язык функциональных блок-диаграмм используется для программирования современных контроллеров.

Система уравнений является нелинейной, и получить ее общее аналитическое решение затруднительно, поэтому на следующем этапе предлагается создать имитационную модель, которая позволит провести численный эксперимент по исследованию различных режимов работы системы с целью выбора управляющих воздействий и разработке структуры системы управления.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, grant No. 075-15-2021-671).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

1. **Palamutcu S.** Electric energy consumption in the cotton textile processing stages. *Energy*. 2010. 35. P. 2945-2952. DOI: 10.1016/j.energy.2010.03.029.
2. **Fu S., Farrell M.J., Ankeny M.A., Turner E.T., Rizk V.** Hydrogen Peroxide Bleaching of Cationized Cotton Fabric. *AATCC J. Res.* 2019. 6. P. 21-29. DOI: 10.14504/ajr.6.5.4.
3. **Abdel-Halim E.S.** Simple and economic bleaching process for cotton fabric. *Carbohydr. Polym.* 2012. V. 88. P. 1233-1238. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.01.082.
4. **Bullon J., González Arrieta A., Hernández Encinas A., Queiruga Dios A.** Manufacturing processes in the textile industry. Expert Systems for fabrics production. *ADCAIJ*. 2017. 6. P. 15. DOI: 10.14201/ADCAIJ2017641523.
5. **Liu T.-L.** Kinematic Analysis on Winding and Unwinding Process in Tissue Paper Machine and Its Application. *Chungkuo Tsao Chih/China Pulp and Paper*. 2017. 36. P. 52-56. DOI: 10.11980/j.issn.0254-508X.2017.01.010.
6. **Wu Ya.** Designing of Hot Strip Rolling Mill Control System. *World J. Eng. Technol.* 2016. 04. P. 413-417. DOI: 10.4236/wjet.2016.43040.
7. **Калашникова Н.** Энергетические обследования. Способ снизить потребление энергии. *Control Eng. Россия*. 2016. 6 (66). С. 64 – 67. https://controlengrussia.com/e-lektroprivod/abb_electric_drive.
Kalashnikova N. Energy surveys. A way to reduce energy consumption. *Control Eng. Rossiya*. 2016. 6 (66). P. 64 – 67 (in Russian). https://controlengrussia.com/e-lektroprivod/abb_electric_drive.
8. AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Applications. Editor Fouad Giri. P.: John Wiley & Sons, Ltd. April 2013. 584 p.
9. **Volosencu C., Du, Xian, Saghafinia A.** Control Theory in Engineering. Publisher: Intechopen, London, UK. 2020. 374 p.
10. **Morton T.** Jigger Studies II– The Elementary Theory of Jigger Dyeing. *J. Soc. Dyers Colourists*. 2008. 81. P. 52 - 55. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1965.tb02643.x.
11. **Pušnik Nace, Praček S.** The Effect of Winding Angle on Unwinding Yarn. *Transact. Famena*. 2016. 40. P. 29-42. DOI: 10.21278/TOF.40303.
12. Electric Motors and Drives. Austin Hughes, Bill Drury. Newness. 2013. 439 p.
13. Theoretical Mechanics. By Prof. Dr. Ing. Vasile Szolga. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2014. 204 p.
14. **Lobontiu N.** System Dynamics for Engineering Students: Concepts and Applications. Academic Press. 2010. 532 p.
15. **Liu Hong, He Feng.** Study on Moisture Transfer Properties of Polyester-Cotton Fabric. *Adv. Mater. Res.* 2013. 709. P. 211-214. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.709.211.
16. **Palka L., Schauer F., Dostal P.** Modelling of the simple pendulum Experiment. *MATEC Web of Conf.* 2016. 76. P. 04037. DOI: 10.1051/mateconf/20167604037.
17. **Hsieh Long, Chen Tzu-Hsia.** The Design and Efficiency Analysis of Planetary Gear Reducer. *Adv. Mater. Res.* 2011. 317-319. P. 2226-2229. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.317-319.2226.
18. **Gouda Eid, Mezani Smail, Baghli Lotfi, Rezzoug A.** Comparative Study Between Mechanical and Magnetic Planetary Gears. *Magnetics, IEEE Transact.* 2011. 47. P. 439 - 450. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2090890.
19. **Zhu Bin, Qin Wei, Liu Jing** Simulation and Analysis of Dynamical Transmission Precision of 2K-V Cycloid Pin Gear Reducer Based on Multibody System Dynamics. *Adv. Mater. Res.: Adv. Design Technol.* 2012. 3(08). P. 2205-2210. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.308-310.2205.
20. **Nevaranta N., Niemelä Markku, Pyrhönen J., Pyrhönen O., Lindh T.** Indirect tension control method for an intermittent web transport system. 2012. DS2a.2-1. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397253.
21. **Jin Yiwei, Chen Jiankui, Yin Zhouping.** Web Tension Estimation by Local Contact Force Measurement in Roll-to-Roll Manufacturing. *Int. J. Precision Eng. Manufact.* 2020. 21. DOI: 10.1007/s12541-020-00387-9.
22. **Goodwine B.** Engineering Differential Equations: Theory and Applications. Springer-Verlag New York. 2011. P. 745. DOI: 10.1007/978-1-4419-7919-3.
23. AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Applications. Ed. Fouad Giri. John Wiley & Sons, Ltd. 2013. 574 p.
24. **Liao Zili, Zhao Qijin, Zhang Xinxi, Chen Luming.** (). Research on Speed Sensorless Vector Control System of Asynchronous Motor Based on MRAS. *MATEC Web of Conf.* 2018. 160. P. 02006. DOI: 10.1051/mateconf/201816002006.
25. **Katsuhiko Ogata.** Modern Control Engineering. Prentice Hall. 2010. 905 p.
26. **Усольцев А. А., Лукичев Д.В.** Настройка регулятора скорости в системе векторного управления асинхронными двигателями. *Науч.-техн. вестн. СПб ГИТМО (ТУ). Вып. 3. Физич. проц., системы и технологии*. 2001. С. 108–112.
Usoltsev A.A., Lukichev D.V. Setting the speed controller in the vector control system for asynchronous motors. *Nauch.-Tekhn. Vestn. SPb GITMO (TU). Iss. 3. Fizich. Prots., Sistemy Tekhnol.* 2001. P. 108–112 (in Russian).
27. **Madathodika Asna, Shareef H., Khalid S.N., Dosari A., Hamad Basil, Alhammadi Munira, Aldarmaki Nasser.** Analysis and design of single-phase voltage-frequency converter with optimized PI controller. *IJPEDS*. 2019. P. 522-529. DOI: 10.11591/ijpeds.v10.i1.

Поступила в редакцию 25.05.2021
Принята к опубликованию 11.10.2021

Received 25.05.2021
Accepted 11.10.2021