

УДК 681.532

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ БУМАЖНОЙ МАССЫ В НАПОРНОМ ЯЩИКЕ

Билоус О.А.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: boa@msa.pstu.ac.ru

Разработан контур автоматического регулирования уровня бумажной массы в напорном ящике бумагоделательной машины БДМ путём частотного регулирования производительности насоса на предприятии ООО «ПРИКАМСКИЙ КАРТОН». На основе предлагаемой функциональной схемы САР получена математическая модель в виде алгоритмической структурной схемы. Подробно описан процесс получения передаточных функций типовых звеньев проектируемой системы. Полученная структурная схема объекта обладает астатизмом первого порядка, представлена набором инерционных звеньев. Установочные параметры ПИД-регулятора определены методом Зиглера-Никольса, точная настройка проведена модельно-экспериментальным способом. С учётом возможностей реализации контура разработанной САР введено ограничение на значение выходного сигнала ПИД-регулятора диапазоном тока $4 \div 20$ мА. Произведено моделирование системы в среде Scilab. Введение нелинейного звена в канал управления не отразилось на показателях качества САР. Показатели качества САР с ПИД-регулятором удовлетворяют требованиям технологического процесса.

Ключевые слова: система автоматического регулирования уровня, показатели качества, ПИД-регулятор

SYNTESYS OF THE AUTOMATIC PAPER PULP LEVEL CONTROL SYSTEM IN THE HEADBOX

Bilous O.A.

Federal State Budget Educational Establishment «Perm National Research Polytechnical University»,
Perm, e-mail: boa@msa.pstu.ac.ru

The loop of automatic paper pulp level control in the head box of papermaking machine by the way of frequency control of the pump capacity at «Priamskiy Karton Ltd.» was developed. The mathematical model in the form of algorithmic structure diagram based on proposed functional scheme of the automatic control system was obtained. The process of obtaining of transfer functions of typical blocks of developing system was described in detail. Obtained structure diagram of the object has a first-order astatism and presented as a set of relaxation circuits. Setup parameters of the PID-controller calculated using the Ziegler-Nichols method; the fine adjustment was carried out using model-experimental method. Considering the implementation possibilities of developed system loop the limitation on the output signal value of the PID-controller in the range of current from 4 to 20 mA was set up. The system simulation in SCILAB was carried out. Inserting of non-linear block in the control channel did not affect quality indexes. Quality indexes of automatic control system with PID-controller meet technological process requirements.

Keywords: system of automatic level control, quality indexes, PID-controller

Рассматривается процесс автоматического управления уровнем бумажной массы в напорном ящике бумагоделательной машины БДМ. В герметично закрытом напорном ящике над бумажной массой создается давление (разряжение) в зависимости от скорости машины. Необходимо поддерживать скорость выхода бумажной массы из щели V_M . Эта скорость зависит от суммарного напора H , который, в свою очередь, складывается из уровня бумажной массы и давления воздушной подушки в напорном ящике. Скорость выхода должна соответствовать скорости формирующей сетки V_C бумагоделательной машины. Уровень бумажной массы приблизительно постоянный (в зависимости от отклонения, заданного оператором), и основное влияние на скорость выхода массы оказывает давление воздушной подушки. Соответственно, при увеличении давления расход бумажной массы увеличится, и её уровень в напорном ящике начнет падать. В этот момент насос, пода-

ющий бумажную массу в напорный ящик, должен увеличить производительность ровно на столько, чтобы уровень удерживался на требуемой величине $h^* = 330$ мм.

Требуемое значение коэффициента перерегулирования в переходном процессе определяется по формуле

$$\sigma\% \leq \left| \frac{h_{\min} - h^*}{h^*} \cdot 100\% \right|, \quad (1)$$

где h^* – заданное значение уровня бумажной массы в напорном ящике; $h_{\min}$ – минимально допустимое значение уровня бумажной массы в напорном ящике в соответствии с требованиями технологического процесса (310 мм).

Подставляя численные значения параметров в формулу (1), получаем допустимое значение коэффициента перерегулирования бумажной массы в переходном процессе, равное 6,45%. Время переходного процесса по технологии не должно

превышать 10 с ($t_{пп} \leq 10$). Величина установившейся ошибки должна быть равной нулю ($\varepsilon_{уст} = 0$).

Функциональная схема системы автоматического регулирования уровня бумажной массы в напорном ящике. Структурная схема, отображающая все необходимые функциональные блоки и связи между ними, представлена на рис. 1.

Скорость вращения ω вала асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором через соединительную муфту передаётся на вал насосного агрегата, приводя его в работу и регулируя производительность Q на выходе насоса. Посредством изменения производительности насоса регулируется уровень бумажной массы h в напорном ящике.

На вход тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ) подаётся сигнал задания частоты $I_{зч}$, на выходе ТПЧ – пропорционально изменяющиеся частота f и напряжение U . Посредством изменения питающей частоты и напряжения ТПЧ осуществляет управление асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором, который приводит во вращение насос, подающий бумажную массу в напорный ящик.

В процессе автоматического регулирования требуется непрерывно отслеживать текущее состояние регулируемого параметра. Для этого необходим датчик уровня жидкости. На его вход непрерывно поступает физическая величина измеряемого параметра – уровень бумажной массы в напорном ящике h , а на выходе – унифицированный аналоговый сигнал обратной связи в форме тока $I_{ос}$ (4÷20 мА) или напряжения $U_{ос}$ (0÷10 В).

Для выполнения функций автоматического регулирования уровня в состав САР вводится регулятор. Для реализации регуля-

тора необходимо вычислительное устройство, позволяющее с заданным быстродействием контролировать параметры объекта и в реальном времени рассчитывать управляющие воздействия. Таким требованиям удовлетворяют современные промышленные контроллеры. Входы регулятора принимают сигналы задания $I_3(U_3)$ и обратной связи $I_{ос}(U_{ос})$, а на выходе его формируется сигнал управления ТПЧ $I_{зч}$.

Математическое описание САР. С целью анализа и программной реализации контура автоматического регулирования необходимо с учётом выбранной аппаратуры перейти от функциональной схемы к алгоритмической структурной схеме САР. Для этого отдельные функциональные блоки представляются в виде типовых звеньев.

Напорный ящик (объект регулирования) представляется на структурной схеме идеальным интегрирующим звеном. Передаточная функция объекта

$$W_o = \frac{k_o}{p}, \quad (2)$$

где k_o – передаточный коэффициент, определяется в установившемся режиме по формуле

$$k_o = \frac{\Delta h_{Q_H}}{Q_H}, \quad (3)$$

где Q_H – номинальная производительность насосной установки; Δh_{Q_H} – скорость изменения уровня, обусловленная только управлением, то есть изменение уровня бумажной массы за единицу времени при отсутствии возмущения ($P = 0$) и номинальной производительности насоса. Данный метод определения коэффициента интегрирования объекта по каналу управления изображён на рис. 2.

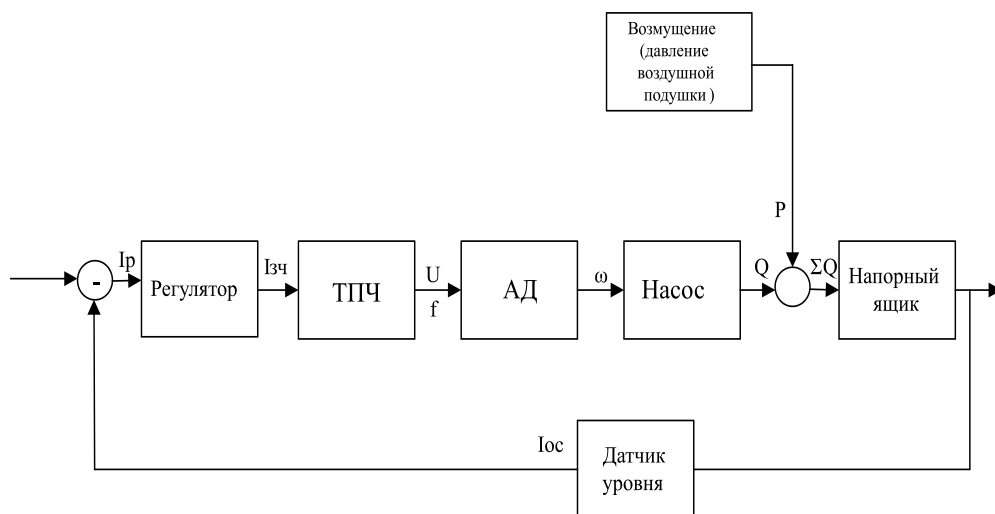


Рис. 1. Функциональная схема САР уровня бумажной массы в напорном ящике

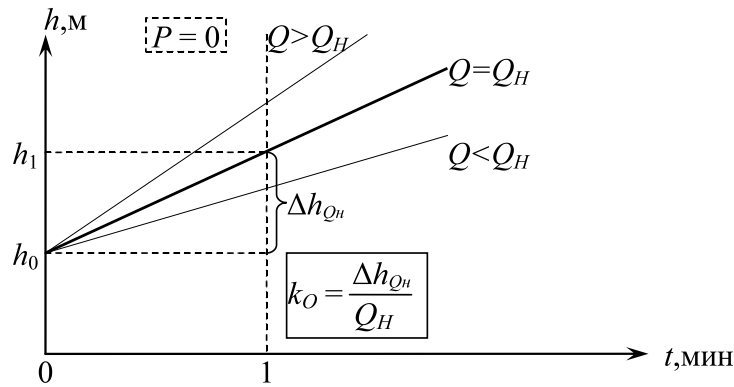


Рис. 2. Временной график изменения уровня при заданных значениях производительности насоса

Номинальная производительность насосной установки V_H равна $27 \text{ м}^3/\text{мин}$. Объём бумажной массы Q_H в напорном ящике при номинальном значении уровня равен $1,553 \text{ м}^3$. Для того, чтобы рассчитать скорость изменения уровня при нулевом возмущающем воздействии, необходимо учитывать расход бумажной массы, вытекающей через напускную щель напорного ящика, и расход бумажной массы для перелива в сепаратор. Объём бумажной массы $Q_{\text{перелив}}$, затрачиваемый на перелив в сепаратор, составляет примерно 5–6% от общего расхода бумажной массы ($1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$).

Для вычисления расхода бумажной массы $Q_{\text{щели}}$, вытекающей через напускную щель напорного ящика, нужно знать высоту открытия напускной щели при максимальной производительности напорного ящика ($500 \text{ м}/\text{мин}$). Максимальная производительность напорного ящика с учетом перелива бумажной массы в сепаратор вычисляется по формуле

$$Q_{\text{ня}} = Q_H - Q_{\text{перелив}} = 25,5 \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (4)$$

Объём бумажной массы, вытекающей за одну минуту из напорного ящика также может быть вычислен по формуле

$$Q_{\text{ня}} = b \cdot l \cdot V_M, \quad (5)$$

где V_M – скорость истечения массы из напорного ящика, $Q_{\text{ня}}$ – объёмный расход массы, b, l – ширина и высота открытия щели.

Ширина b в соответствии с конструкцией напорного ящика равна $3,5 \text{ м}$. Тогда можно вычислить высоту открытия напускной щели при максимальной производительности напорного ящика $b = 14,5 \text{ мм}$ ($0,0145 \text{ м}$). Скорость истечения массы из напорного ящика при нулевом возмущающем воздействии ($P = 0$) и при номинальном уровне $V_{MP=0} = 152,67 \text{ м}/\text{мин}$. Объёмный расход бумажной массы, вытекающей из на-

порного ящика, при нулевом возмущающем воздействии:

$$Q_{\text{ня}, P=0} = b \cdot l \cdot V_{MP=0} = 7,74 \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (6)$$

Таким образом, скорость изменения уровня в напорном ящике при номинальной производительности насоса можно вычислить по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta h_{Q_H} &= \frac{Q_H - Q_{\text{ня}, P=0} - Q_{\text{перелив}}}{V_H} \cdot h^* = \\ &= \frac{27 - 7,74 - 1,5}{1,553} \cdot 0,33 = 3,77 \text{ м}/\text{мин}. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя рассчитанные значения Δh_{Q_H} и Q_H в формулу (3), определяем численное значение статического коэффициента интегрирования и передаточную функцию объекта по каналу управления:

$$W_O = \frac{0,147}{p}. \quad (8)$$

Передаточная функция канала возмущения (давление воздушной подушки) представляется в виде апериодического звена, так как изменение давления воздушной подушки происходит не мгновенно, а с некоторой инерционностью. Передаточная функция возмущающего воздействия:

$$W_F = \frac{1}{T_F p + 1} = \frac{1}{1,8 p + 1}, \quad (9)$$

где T_F – постоянная времени, вычислена экспериментальным путем.

Сигнал по каналу возмущения будет приходить с отрицательным знаком, так как при возмущении уровень бумажной массы уменьшается.

Передаточная функция насосной установки. Регулирующий насос представляет собой апериодическое звено, преобразующее скорость вращения вала ω на входе

в производительность насоса. Передаточная функция насоса имеет вид:

$$W_H = \frac{k_H}{T_H p + 1} = \frac{0,00289}{0,2p + 1}; \quad (10)$$

где k_H – статический передаточный коэффициент насоса; T_H – постоянная времени насоса.

Постоянную времени для насоса принимаем $T_H = 0,2$ с. Коэффициент передачи насоса определяется в статическом режиме как отношение номинальной производительности насоса Q_H к номинальной скорости электродвигателя насоса ω_H . Номинальная производительность $Q_H = 27$ м³/мин, (0,45 м³/с); номинальная скорость $\omega_H = 1488$ об/мин, (155,74 рад/с).

Передаточная функция асинхронного электродвигателя Siemens 1LA8 315-4AB:

$$W_{дв} = \frac{k_{дв}}{T_{дв} p + 1} = \frac{3,11}{0,87p + 1}, \quad (11)$$

где $k_{дв}$ – статический передаточный коэффициент асинхронного электродвигателя; $T_{дв}$ – постоянная времени двигателя.

Статический передаточный коэффициент двигателя определяется как отношение угловой скорости вращения двигателя ω к частоте питающей сети f . Номинальная частота питания $f_H = 50$ Гц, а значение номинальной угловой скорости вращения двигателя ω_H рассчитывается из номинальной частоты вращения ротора по формуле:

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1488}{60} = 155,74 \text{ рад/с.} \quad (12)$$

Передаточная функция тиристорного преобразователя:

$$W_{тп} = \frac{k_{тп}}{T_{тп} p + 1} = \frac{2,5}{0,0063p + 1}. \quad (13)$$

Передаточный коэффициент тиристорного преобразователя определяется в статическом режиме при номинальном значении выходного воздействия по формуле

$$k_{тп} = \frac{f_H}{I_{вх.н}}, \quad (14)$$

где f_H – частота на выходе тиристорного преобразователя, обеспечивающая номинальный режим работы двигателя; $I_{вх.н}$ – управляющий ток на входе ТПЧ, который обеспечивает номинальную частоту на выходе.

Поскольку управление ТПЧ осуществляется током 4÷20 мА, а частоту двигателя необходимо изменять в диапазоне 0÷50 Гц, то номинальной частоте двигателя ($f_H = 50$ Гц) будет соответствовать входное напряжение управления ТПЧ $I_{вх.н} = 20$ мА.

Постоянная времени тиристорного преобразователя определяется по формуле

$$T_{тп} = T_{\phi} + \frac{1}{2 \cdot m \cdot f_H}, \quad (15)$$

где T_{ϕ} – постоянная времени цепи системы импульсно-фазового управления (СИФУ) ТПЧ, включая фильтр; m – число фаз ТПЧ.

Значение постоянной времени цепи СИФУ тиристорных преобразователей обычно составляет 0,003÷0,005 с, поэтому при моделировании принято принимать значение T_{ϕ} из данного диапазона. С учётом относительной новизны выбранного частотного преобразователя принимаем минимальное значение $T_{\phi} = 0,003$ с. Поскольку ТПЧ осуществляет управление трёхфазным двигателем, то число фаз $m = 3$. Номинальное значение выходной частоты f_H составляет 50 Гц.

Датчик уровня как элемент структурной схемы представляет собой безынерционное звено.

В напорном ящике поддерживается постоянный уровень 0,33 метра, что соответствует примерно 15 мА на выходе датчика. Отсюда найдем передаточную функцию датчика уровня:

$$W_{д\psi} = K_{д\psi} = \frac{I_{д\psi}}{h^*} = \frac{15}{0,33} = 45,45. \quad (16)$$

Моделирование САР. При моделировании в пакете Scilab был получен график переходной характеристики объекта управления (рис. 3).

Из переходной характеристики объекта видно, что уровень бумажной массы резко уменьшится, если давление воздушной подушки увеличится. Значения параметров ПИД-регулятора рассчитаны по методу Зиглера-Николса: в структурную схему необходимо ввести ограничения, обусловленные возможностями реализации структурных блоков. В частности, особые требования предъявляются к сигналу управления тиристорным преобразователем: это должен быть токовый сигнал 4÷20 мА. В модели с ПИД-регулятора на звено ТПЧ подаётся сигнал, величина которого не ограничена и может превышать реально возможные пределы. Ограничение данного сигнала как любая нелинейность может повлиять на показатели качества регулирования в статике и динамике, однако оно неизбежно ввиду ограниченных возможностей реализации системы, и поэтому пренебрегать им не следует. Структура САР уровня бумажной массы в напорном ящике приведена на рис. 4, там же приведены два графика с общей временной осью: нижний график отражает управляющее воздействие с выхода ПИД-регулятора, ограниченное диапазоном 4÷20 мА; верхний график – соответствующая данному управлению переходная характеристика САР.

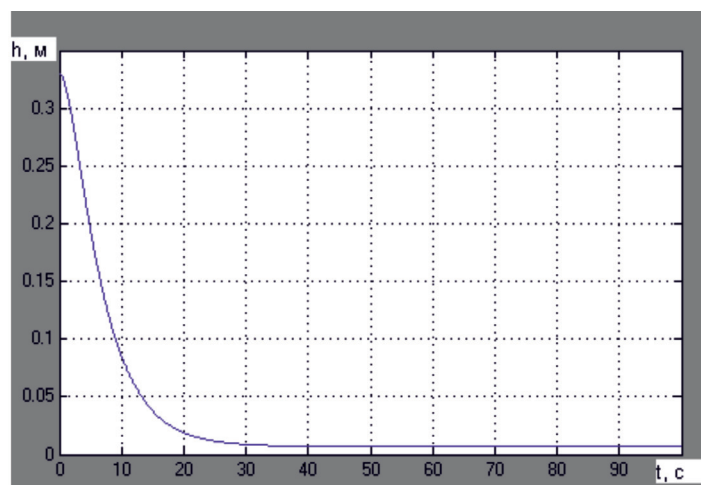


Рис. 3. Переходная характеристика объекта управления

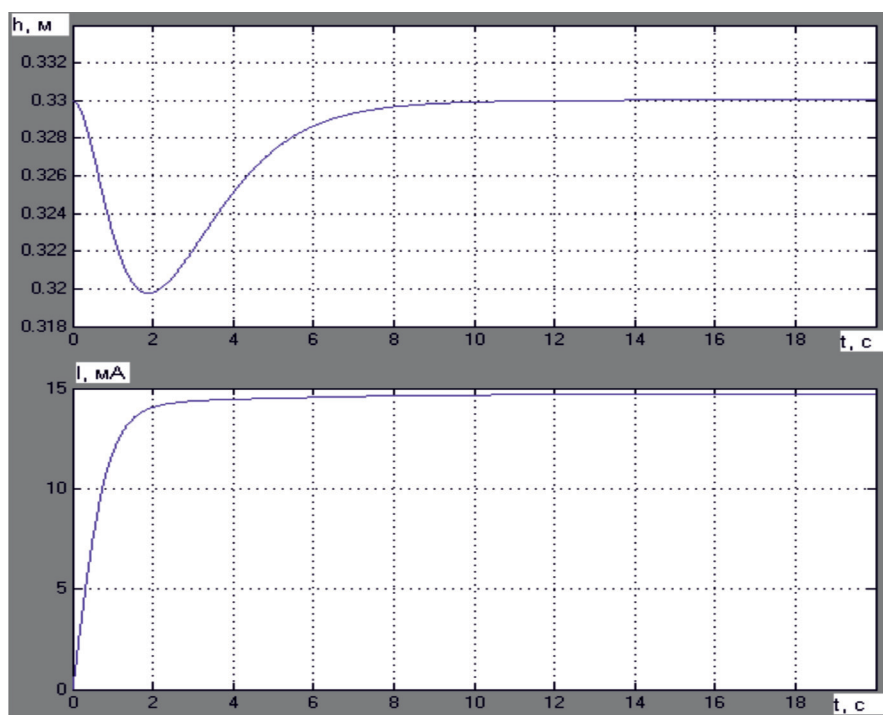
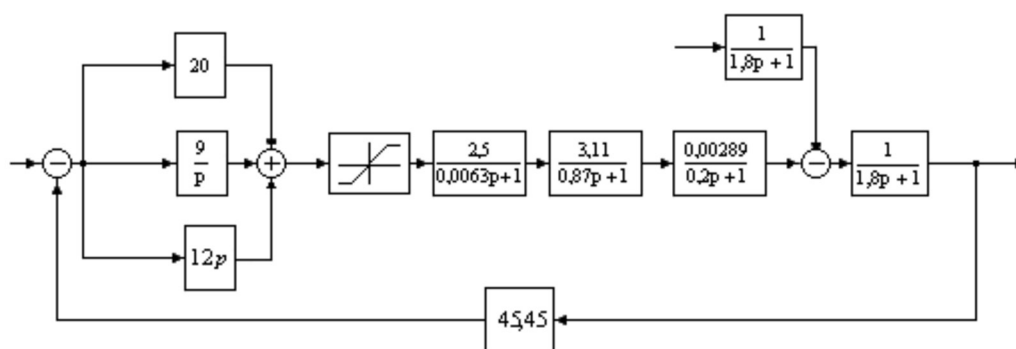


Рис. 4. Модель САУ уровня бумажной массы в напорном ящике и переходная характеристика САУ уровня бумажной массы с введённым ограничением выходного сигнала регулятора

Заключение

Проведенный синтез системы автоматического регулирования уровня позволил добиться показателей качества, удовлетворяющих требованиям технологического процесса.

Список литературы

1. Даденков Д.А., Черемных Д.Н., Каверин А.А. Разработка и реализация алгоритма управления технологическим процессом экспериментальной установки имитации контуров регулирования целлюлозно-бумажного производства // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. Cals-технологии в энергетике: Пермь, ПНИПУ – 2012. – С. 296–308.
2. Даденков Д.А., Черемных Д.Н., Честиков А.П. Синтез и моделирование локальных контуров регулирования учебно-экспериментальной установки целлюлозно-бумажного производства // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 7. – С. 131–142.
3. Даденков Д.А., Шилиев Д.В. Сравнительный анализ методов синтеза систем регулирования скорости микроприводов постоянного тока // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 7. – С. 74–82.
4. Данилов С.Н. SCICOS Пакет SCILAB для моделирования динамических систем – Тамбов, ТГТУ – 2011. – С. 74.
5. Черемных Д.Н., Даденков Д.А., Рябухин А.Л. Синтез и настройка локальных контуров регулирования уровня и расхода учебно-экспериментальной установки // Перспективы развития техники и технологий в целлюлозно-

бумажной промышленности. Пермский ЦНТИ. – 2014. – С. 101–110.

References

1. Dadenkov D.A., Cheremnykh D.N., Kaverin A.A. Energetika. Innovatsionnye napravleniya v energetike. Cals-tekhnologii v energetike: Perm, PNIPU, 2012. pp. 296–308.
2. Dadenkov D.A., Cheremnykh D.N., Chestikov A.P. Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2013. no. 7. pp. 131–142.
3. Dadenkov D.A., Shilyaev D.V. Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2013. no. 7. pp. 74–82.
4. Danilov S.N. SCICOS Paket SCILAB dlya modelirovaniya dinamicheskikh system. Tambov, TGTU, 2011. 74 p.
5. Cheremnykh D.N., Dadenkov D.A., Ryabukhin A.L. Perspektivy razvitiya tekhniki i tekhnologiy v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti. Permskiy TsNTI, 2014. pp. 101–110.

Рецензенты:

Казанцев В.П., д.т.н., доцент, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Бочкарев С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.