

УДК 676.011:62-5(075)

**Ю.С. Жукова, И.В. Бондаренкова, Д.В. Ерушковская**Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского  
государственного университета промышленных технологий и дизайна**АНАЛИЗ УПРАВЛЯЕМОСТИ ЦВЕТОМ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА  
НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ**

В статье рассматривается методика анализа управляемости многомерного объекта на примере цвета бумажного полотна. Многомерный объект – это объект управления, математическая модель функционирования которого содержит несколько управляющих и (или) управляемых координат. Так как цвет бумаги является важным показателем ее качества (качество – это совокупность объективно присущих продукции свойств и характеристик, уровень или вариант которых формируется при создании продукции с целью удовлетворения существующих потребностей), а управление цветом бумаги осуществляется изменением расходов одного и более колорантов (концентрированный раствор или сухой порошок, добавляемый к краске для получения определенного цвета), то объект управления цветом рассматривается как многомерный объект. Проведен анализ управляемости цвета бумажного полотна при определенных допущениях. Предложена модель многомерного линейного объекта в пространстве состояний, имеющая вид уравнения состояния и уравнения наблюдения. Определены матрицы состояния (A), коэффициентов влияния расходов колорантов на цветовые координаты (B) и наблюдений (C). Для проверки управляемости получена матрица управляемости (L) по переменным состояниям и по наблюдаемым переменным. Определены критерии управляемости объекта по состоянию и по наблюдаемым переменным. Проведена проверка управляемости объекта по выбранным критериям. Рассмотрен практический пример применения методики анализа управляемости объекта по цветовым координатам на бумагоделательной машине. Сделан вывод о том, как определяется полная управляемость объекта по цветовым координатам. Разработанная методика позволяет проводить анализ управляемости объекта по цветовым координатам и различным видам колорантов.

**Ключевые слова:** методика, анализ, многомерный объект, цвет, бумажное полотно, управляемость объекта, цветовые координаты, колорант, белизна.

**Yu.S. Zhukova, I.V. Bondarenkova, D.V. Erushkovskaya**Higher School of Technology and Energy Saint-Petersburg State University  
of Industrial Technologies and Design**ANALYSIS OF PAPER WEB COLOR CONTROL  
ON A PAPER MACHINE**

In the article the controllability analysis method of a multidimensional object is considered on the example of color of paper web. A multidimensional object is a control object whose mathematical model contains several control and (or) controlled coordinates. Because the paper color is an important indicator of its quality (Quality is a set of objectively inherent properties and characteristics of production, the level or variant of which is formed when creating production in order to meet existing needs) and control of the paper color is implemented by changes in the flow of one or more colorants (concentrated solution or dry powder which added to the paint for a certain color), that the color management object is

considered as a multidimensional object. The analysis of the controllability of the paper web color is done. A model of a multidimensional linear object in the state space is proposed, as an equations of the state and the observation. The matrices of state (A), the coefficients of the influence of flow colorants to color coordinates (B) and observations (C) are determined. The controllability matrix on the variable states and for observable variables (L) is obtained to verify controllability. The criteria for the controllability of the object are specified. The inspection of the object controllability to the selected criteria is checked. A practical example of the using of the method for analyzing the object controllability using color coordinates on a paper machine is considered. A conclusion is drawn about how the complete controllability of an object by the color coordinates is determined. The method allows to analyze the controllability of the object by the color coordinates and different types of colorants.

**Keywords:** method, analysis, multidimensional object, color, paper web, controllability of object, color coordinates, colorant, whiteness.

Цвет бумаги является одним из важных показателей её качества. Цветовые координаты определяют, используя национальные и международные стандартные колориметрические системы. Наиболее распространенной является система CIE с цветовыми координатами  $L, a, b$  [1].

Для характеристики цвета используют также различные колориметрические индексы. Например, для белого вида бумаги показатель «белизны» оценивают чаще всего в стандартах TAPPI (Brightness) и CIE (Whiteness). Существуют формулы расчета «белизны», формируемой как линейная комбинация цветовых координат.

Использование конкретной системы, характеризующей цвет бумажного полотна, диктуется заказчиком бумаги.

Управление цветом бумаги на бумагоделательной машине (БДМ) осуществляется изменением расходов одного и более колорантов [1].

Таким образом, объект управления цветом следует рассматривать как многомерный объект. Соответственно, в первую очередь, возникает вопрос его «управляемости».

В теории многомерных систем объект называется *полностью управляемым*, если найдется такое управление, которое обеспечивает перевод объекта из любого начального состояния в произвольное состояние за конечное время [2].

Анализ управляемости цвета бумажного полотна проводится при следующих допущениях:

- различия динамических характеристик трех каналов управления цветом готовой бумаги на БДМ не существенны;
- ограничения исполнительных устройств не учитываются;
- контролируются или все три цветовые координаты, или один колориметрический индекс типа «белизна».

Тогда модель многомерного линейного объекта в пространстве состояний в векторной канонической форме будет иметь вид [3]:

– уравнение состояния:

$$\frac{dX(t)}{dt} = AX(t) + BU(t), \quad (1)$$

– уравнение наблюдений:

$$Y(t) + CX(t), \quad (2)$$

где  $t$  – время;  $\mathbf{X}$  – вектор состояния размерности 3,  $\mathbf{X} = \begin{vmatrix} L \\ a \\ b \end{vmatrix}$ ;  $L, a, b$  – от-

клонения цветовых координат от номинального значения;  $\mathbf{U}$  – вектор

управления,  $\mathbf{U} = \begin{vmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{vmatrix}$ ;  $F_1, F_2, F_3$  – отклонения расходов колорантов;  $\mathbf{Y}$  –

вектор наблюдений цветовых координат, размерности 3,  $\mathbf{Y} = \begin{vmatrix} L \\ a \\ b \end{vmatrix}$ ;

в случае контроля только белизны:  $\mathbf{Y}$  – вектор наблюдений размерности 1;  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  – матрицы,  $\mathbf{A}$  – матрица состояния:

$$\mathbf{A} = -\frac{1}{T} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = -\frac{1}{T} \mathbf{I},$$

где  $T$  – постоянная времени каналов управления;  $\mathbf{I}$  – единичная матрица;  $\mathbf{B}$  – матрица коэффициентов влияния расходов колорантов на цветовые координаты:

$$\mathbf{B} = \begin{vmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \end{vmatrix},$$

где  $\mathbf{C}$  – матрица наблюдений, в случае контроля всех трех цветовых координат  $\mathbf{C} = \mathbf{I}$ , в случае контроля только «белизны» бумаги:  $\mathbf{C} = \begin{vmatrix} \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{vmatrix}$ .

Управляемость объекта может рассматриваться как по переменным состояниям, так и по наблюдаемым переменным [2].

Для проверки управляемости объекта по переменным состояниям из матриц **A** и **B** формируется матрица управляемости **L** вида:

$$\mathbf{L} = \{B|AB|\dots|A^{n-1}B\}, \quad (3)$$

где  $|$  – знак присоединения матриц,  $n$  – размерность вектора состояния.

Критерий управляемости объекта по состоянию: ранг матрицы управляемости должен быть равен размерности вектора состояния.

Для проверки управляемости объекта по наблюдаемым переменным из матриц **A**, **B** и **C** формируется матрица управляемости **L** вида:

$$\mathbf{L} = \{CB|CAB|\dots|CA^{n-1}B\}, \quad (4)$$

где  $|$  – знак присоединения матриц.

Критерий управляемости объекта по наблюдаемым переменным: ранг матрицы управляемости должен быть равен размерности вектора наблюдения.

Для определения управляемости рассматриваемого объекта необходимо сформировать матрицу управления по состоянию, которая в соответствии с уравнением (3) имеет следующий вид:

$$\mathbf{L} = \{B|AB|A^2B\} = \{B|-\frac{1}{T}IB|\frac{1}{T^2}IB\} = \{B|-\frac{1}{T}B|\frac{1}{T^2}B\}.$$

Ранг этой матрицы будет равен рангу матрицы **B**, так как строки и столбцы остальной части матрицы **L** линейно зависимы:  $\text{rank } \mathbf{L} = \text{rank } \mathbf{B}$  [4].

Не сложно доказать, что в случае контроля всех координат цвета бумаги ранг управляемости по *наблюдаемым* переменным будет также определяться рангом матрицы **B**.

В случае контроля только одного колориметрического индекса бумаги, например «белизны», матрица управляемости по наблюдаемой переменной в соответствии с уравнением (4) имеет вид:

$$\mathbf{L} = \{CB |CAA |CA^2B\} = \left\{ CB \mid C\left(-\frac{1}{T}B\right) \mid C\left(\frac{1}{T^2}B\right) \right\},$$

где **L** – матрица размерностью 1×6. Если **B** – ненулевая матрица, то ранг матрицы управляемости  $\text{rank } \mathbf{L} = 1$ , как и размерность вектора наблюдения. Следовательно, объект управления «белизной» бумаги полностью управляем.

*Пример 1.* Рассмотрим процесс производства типографской бумаги. На БДМ используются фиолетовый и синий красители, а также оптический отбеливатель.

Проверим управляемость объекта по цветовым координатам.

Матрица влияния расходов на отклонения цветовых координат от номинального режима имеет вид [4]:

$$\mathbf{B} = \begin{vmatrix} -0,086 & -0,98 & +0,092 \\ +0,061 & -0,044 & 0,229 \\ -0,071 & -0,145 & -1,060 \end{vmatrix}.$$

Расчеты показывают, что имеется хотя бы один определитель 3-го порядка матрицы  $\mathbf{B}$  не равный нулю, следовательно, ранг матрицы  $\text{rang } \mathbf{B} = 3$ . Таким образом, рассматриваемый объект по цветовым координатам полностью управляем.

**Выводы.** Анализ управляемости цветом бумаги на БДМ показал, что полная управляемость объекта по цветовым координатам определяется матрицей влияния расходов колорантов на цветовые координаты. В случае, если осуществляется контроль только одного колориметрического индекса бумаги, то при наличии хотя бы одного красителя объект по наблюдаемой переменной полностью управляем.

Рассмотренная методика может быть использована для проверки управляемости объекта при разных вариантах контроля цветовых координат, а также разных видах колорантов.

### **Библиографический список**

1. Иванов С.Н. Технология бумаги. – М.: Школа бумаги, 2006. – 696 с.
2. Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. – М.: Наука, 1979. – 247 с.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
4. Жукова Ю.С., Онохин Д.С., Пожитков В.В. Модели объекта управления цветом бумаги // Машины и аппараты целлюлозно-бумажной промышленности: межвуз. сб. науч. тр. / СПбГТУРП. – СПб., 2008.

5. Жукова Ю.С., Попов В.Б. Метод оценки неравномерности просвета бумажного полотна // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы III Междунар. науч.-техн. конф.; 9–11 сентября 2015 г. – Архангельск: Изд-во Северного (Арктический) федерального ун-та 2015.

6. Тыртышников Е.Е. Матричный анализ и линейная алгебра. – М.: Озон, 2007. – 480 с.

7. Аким Э.Л. Обработка бумаги (Основы химии и технологии обработки и переработки бумаги и картона). – М.: Лесная промышленность, 1979. – 229 с.

8. Флятте Д.М. Свойства бумаги: учеб. пособие. – 5-е изд. – СПб.: Лань, 2012. – 400 с.

9. Всесоюзный научно-исследовательский институт целлюлозно-бумажной индустрии [Электронный ресурс]. – URL: <http://kursika.ru/doc466595.html> (дата обращения: 20.03.2017).

10. Жукова Ю.С. Михайловская Н.Г. Требушук Д.В. Чувствительность каналов управления цветом бумаги // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвуз. сб. науч. тр. к 75-летию ун-та. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. гос. технол. ун-та растительных полимеров, 2005. – С. 100–102.

11. Жукова Ю.С. Управление качественными показателями бумаги на бумагоделательных машинах: учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленинград. лесотехн. акад., 1984. – 37 с.

12. Суриков В.Н., Соминин М.А. Повышение точности управления качественными показателями бумажного полотна // Современные системы контроля и управления качеством бумаги: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2007. – С. 30.

13. Официальный сайт компании Valmet. – URL: <http://www.valmet.com/products/automation/valmet-iq-quality-control-system/> (дата обращения: 20.03.2017).

14. Официальный сайт компании VOITH. – URL: <http://voith.com/en/index.html> (дата обращения: 20.03.2017).

15. Официальный сайт компании ABB. – URL: <http://www.abb.ru/> (дата обращения: 20.03.2017).

16. Официальный сайт компании HONEYWELL. – URL: <https://honeywell.com/country/ru/Pages/home.asp> (дата обращения: 20.03.2017).

## References

1. Ivanov S.N. Tekhnologiya bumagi [Paper technology]. Moscow: Shkola bumagi, 2006. 696 p.
2. Voronov A.A. Ustoichivost', upravliaemost', nabliudaemost' [Stability, controllability, observability]. Moscow: Nauka, 1979. 247 p.
3. Besekerskii V.A., Popov E.P. Teoriia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia [Automatic control system theory]. 3rd ed. Moscow: Nauka, 1975. 768 p.
4. Zhukova Iu.S., Onokhin D.S., Pozhitkov V.V. Modeli ob"ekta upravleniia tsvetom bumagi [Object models of paper color management. Machinery and equipment of pulp, paper and board industry]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov "Mashiny i apparaty tselliulozno-bumazhnoi promyshlennosti"*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet rastitel'nykh polimerov, 2008.
5. Zhukova Iu.S., Popov V.B. Metod otsenki neravnomernosti prosveta bumazhnogo polotna [Evaluation method of paper web inequality]. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Problemy mekhaniki tselliulozno-bumazhnykh materialov"*, 9–11 September 2015. Arkhangel'sk: Severnyi (Arkticheskii) federal'nyi universitet, 2015.
6. Tyrtysnikov E.E. Matrichnyi analiz i lineinaia algebra [Matrix analysis and linear algebra]. Moscow: Ozon, 2007. 480 p.
7. Akim E.L. Obrabotka bumagi (Osnovy khimii i tekhnologii obrabotki i pererabotki bumagi i kartona) [Paper processing (Basic chemistry and processing and converting the paper and hardboard paper technologies)]. Moscow: Lesnaia promyshlennost', 1979. 229 p.
8. Fliatte D.M. Svoistva bumagi [Paper properties]. 5nd. Saint Petersburg: Lan', 2012. 400 p.
9. Vsesoiuznyi nauchno-issledovatel'skii institut tselliulozno-bumazhnoi industrii [All-Russian scientific-research institute of pulp and paper industry], available at: <http://kursika.ru/doc466595.html> (accessed 20 March 2017).
10. Жукова Ю.С. Михайловская Н.Г. Требуцук Д.В. Чувствительность каналов управления цветом бумаги [Tolerance of the paper color channel control]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov k 75-letiiu universiteta "Mashiny i apparaty tselliulozno-bumazhnoi proizvodstva"*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet rastitel'nykh polimerov, 2005, pp. 100-102.

11. Zhukova Iu.S. Upravlenie kachestvennymi pokazateliami bumagi na bumagodelatel'nykh mashinakh [Paper quality factors management on the web-formers]. Leningrad: Leningradskaia lesotekhnicheskaiia akademiia, 1984. 37 p.

12. Surikov V.N., Sominin M.A. Povyslenie tochnosti upravleniia kachestvennymi pokazateliami bumazhnogo polotna [Increasing the control accuracy of paper web quality factors]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennye sistemy kontroliia i upravleniia kachestvom bumagi"*. Saint Petersburg, 2007. P. 30.

13. Ofitsial'nyi sait kompanii Valmet [Official web-site of Valmet], available at: <http://www.valmet.com/products/automation/valmet-iq-quality-control-system/> (accessed 20 March 2017).

14. Ofitsial'nyi sait kompanii VOITH [Official web-site of VOITH], available at: <http://voith.com/en/index.html> (accessed 20 March 2017).

15. Ofitsial'nyi sait kompanii ABB [Official web-site of ABB], available at: <http://www.abb.ru/> (accessed 20 March 2017).

16. Ofitsial'nyi sait kompanii HONEYWELL [Official web-site of HONEYWELL], available at: <https://honeywell.com/country/ru/Pages/home.asp> (accessed 20 March 2017).

### Сведения об авторах

**Жукова Юлия Сергеевна** (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительных технологий и систем управления Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (195096, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4, тел.: +7(812)786-8610, e-mail: [gukovajs@gmail.com](mailto:gukovajs@gmail.com)).

**Бондаренкова Ирина Владимировна** (Санкт-Петербург, Россия) – доцент кафедры информационно-измерительных технологий и систем управления Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (195096, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4, тел.: +7(812)786-8610, +7(921)302-9175, e-mail: [i\\_v\\_b@mail.ru](mailto:i_v_b@mail.ru)).

**Ерушковская Дарья Викторовна** (Санкт-Петербург, Россия) – преподаватель кафедры информационно-измерительных технологий и систем управления Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (195096, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4, тел.: +7(921)429-1599, e-mail: [md83@bk.ru](mailto:md83@bk.ru)).



### **About the authors**

**Zhukova Iulia Sergeevna** (Saint-Petersburg, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Measuring Technologies and Control Systems of Higher School of Technology and Energy (HSTE) Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (195096, Saint-Petersburg, 4, Ivana Chernykh str., tel.: +7(812)786-8610, e-mail: gukovajs@gmail.com).

**Bondarenkova Irina Vladimirovna** (Saint-Petersburg, Russian Federation) is an Assistant Professor of the Department of Information and Measuring Technologies and Control Systems of Higher School of Technology and Energy (HSTE) Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (195096, Saint-Petersburg, 4, Ivana Chernykh str., tel.: +7(812)786-8610, +7(921)302-9175, e-mail: i\_v\_b@mail.ru).

**Erushkovskaya Darya Viktorovna** (Saint-Petersburg, Russian Federation) is a Lecturer of the Department of Information and Measuring Technologies and Control Systems of Higher School of Technology and Energy (HSTE) Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (195096, Saint-Petersburg, 4, Ivana Chernykh str., tel.: +7(921)429-1599, e-mail: md83@bk.ru).

Получено 28.04.2017