

УДК 004.942

## КОМПЛЕКСНЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

**Прошин И.А., Салмов Е.Н.**

*Пензенский государственный технологический университет, Пенза, e-mail: proshin.Ivan@inbox.ru*

Рассмотрен подход к оценке результатов моделирования и эффективности работы многодвигательного электропривода бумагоделательных машин, рассматриваемого как единая многосвязная многосекционная вентильно-электромеханическая система. Предложенный комплексный критерий оценки основан на анализе совокупного коэффициента полезного действия и отклонений технологических параметров и разработан на базе требований, предъявляемых к работе многодвигательного электропривода бумагоделательных машин. Проведено моделирование многодвигательного электропривода с помощью предложенных авторами методов, численных алгоритмов и комплекса программ и показаны его результаты в соотношении с данными эксперимента. Разработанный комплексный критерий обеспечивает оценивание многосвязных многосекционных вентильно-электромеханических систем в едином пространстве энергетических и технологических параметров с отображением индикаторов эффективности посредством компонентного портрета. Его использование позволяет повысить эффективность моделирования при исследовании и создании многодвигательных электроприводов.

**Ключевые слова:** моделирование, комплексный критерий оценки, бумагоделательная машина, результаты эксперимента

## INTEGRATED EVALUATION CRITERION FOR MODELING OF MULTIPLE MOTOR ELECTRIC DRIVE OF A PAPER MACHINE

**Proshin I.A., Salmov E.N.**

*Penza State Technological University, Penza, e-mail: proshin.Ivan@inbox.ru*

An approach to evaluating the results of modeling and performance of multiple motor of electric drive of paper machines, considered as multilinked multisectional gate-electromechanical system. The proposed integrated evaluation criterion is based on the analysis of aggregate efficiency and deviations of process parameters and is designed based on the requirements for the work of multiple motor electric drive of paper machines. The modeling of multiple motor electric drive using methods, numerical algorithms and software proposed by authors is described. The results of the modeling in relation to the experimental data is shown. Designed integrated criterion provides evaluating of multilinked multisectional gate-electromechanical systems in a single space of energy and technological parameters with displaying of performance indicators with help of component portrait. Using it allows to increase the efficiency of modeling multiple motor drives during study and creation.

**Keywords:** modeling, integrated evaluation criterion, the paper machine, the results of the experiment

При моделировании электропривода бумагоделательных машин как многосвязных многосекционных вентильно-электромеханических систем (ММВЭМС) с помощью созданных авторами методов, численных алгоритмов и комплексов программ [1–5] необходимо получение комплексной оценки эффективности его работы. При этом требуется анализ динамических и статических режимов, принципов функционирования, потребляемой мощности и потерь.

Комплексный критерий сформулирован с учётом требований к функционированию многодвигательного электропривода бумагоделательной машины (рис. 1) [6, 7].

Оценку эффективности работы ММВЭМС по результатам математического моделирования предлагается комплексного критерия:

$$\zeta = (1 - \varepsilon_{v\%}) \cdot (1 - \varepsilon_v) \cdot (1 - \varepsilon_M) \cdot \eta, \quad (1)$$

где  $\eta$  – совокупный коэффициент полезного действия ММВЭМС;  $\varepsilon_v$  – среднее значение отклонения уровня скорости от заданного;  $\varepsilon_{v\%}$  – среднее значение отклонения относительных скоростей от заданных;  $\varepsilon_M$  – среднее значение отклонения распределения нагрузки для секций с жёсткой и упругой механической связью.

Составляющие комплексного критерия вычислим по формулам:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}; \quad \varepsilon_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \varepsilon_{vi}^2}{m}};$$

$$\varepsilon_{v\%} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m-1} \varepsilon_{\%vi}^2}{m-1}}; \quad \varepsilon_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \varepsilon_{Mi}^2}{k}}, \quad (2)$$

где  $\eta_i$  – коэффициент полезного действия  $i$  секции;  $P_i$  – мощность  $i$  секции;  $\varepsilon_{vi}$ ,  $\varepsilon_{\%vi}$ ,  $\varepsilon_{Mi}$  – отклонения по уровню скорости, относительной скорости и распределению момента нагрузки  $i$ -й приводной секции;  $n$  – общее число секций электропривода;  $m$  – число секций, управляемых по скорости;  $k$  – число секций, управляемых по моменту.

В идеальном случае значения индикаторов эффективности стремятся к 1. В случае получения хотя бы одного отрицательного значения индикатора эффективности систему считаем не отвечающей требованиям к ММВЭМС. Для повышения эффективности анализа выполняется построение компонентных портретов для комбинации средних

Управляемая переменная	Назначение	Критерии
Уровень скорости	Задание массы 1 метра квадратного вырабатываемого полотна бумаги. Диапазон значений зависит от ассортимента продукции	Погрешность поддержания не должна превышать $\pm(0,1-0,25)\%$
Относительные скорости	Создание требуемого технологией натяжения полотна бумаги в межсекционных промежутках $v_i^{\%} = \frac{v_i - v_{i-1}}{v_{i-1}} \cdot 100$	Неизменность соотношений при изменении: – момента сопротивления на валу ( $\pm 30\%$ в мокрой части; $\pm 40\%$ в сушильной части; $\pm 50\%$ для каландров и наката); – напряжения питания $\pm 10\%$ ; – частоты сети переменного тока $\pm 1,5\%$ ; – температуры окружающей среды $\pm 10^{\circ}\text{C}$
Распределение нагрузки	Для избежания износа и равномерного движения механизмов в случаях жёсткой и упругой межсекционной связи	Погрешность поддержания соотношения не должна превышать $\pm(0,1-0,25)\%$

Рис. 1. Требования к функционированию электропривода бумагоделательной машины

Индикаторы эффективности  $\delta_{vi}$ ,  $\delta_{\%vi}$ ,  $\delta_{Mi}$  и отклонения параметров, используемые в формулах составляющих комплексного критерия (2), вычислим следующим образом:

$$\varepsilon_{vi} = 1 - \delta_{vi}; \quad \varepsilon_{\%vi} = 1 - \delta_{\%vi}; \quad \varepsilon_{Mi} = 1 - \delta_{Mi}; \quad (3)$$

$$\delta_{vi} = \frac{\Delta_{v0i} - \left| \frac{v_{\text{зад}i} - v_i}{v_{\text{зад}i}} 100 \right|}{\Delta_{v0i}};$$

$$\delta_{\%vi} = \frac{\Delta_{v\%0i} - \left| \frac{v_{\%задi} - v_{\%i}}{v_{\%задi}} 100 \right|}{\Delta_{v\%0i}}; \quad (4)$$

$$\delta_{Mi} = \frac{\Delta_{M0i} - \left| \frac{k_{\text{PM}задi} - k_{\text{PM}i}}{k_{\text{PM}задi}} 100 \right|}{\Delta_{M0i}}, \quad (5)$$

где  $v_i$ ,  $v_{\text{зад}i}$  – фактическая и заданная скорости  $i$ -й приводной секции;  $v_i^{\%}$ ,  $v_{\text{зад}i}^{\%}$  – фактическая и заданная относительные скорости  $i$ -й секции;  $k_{\text{PM}i}$ ,  $k_{\text{PM}задi}$  – фактический и заданный коэффициенты распределения момента нагрузки  $i$ -й секции;  $\Delta_{v0i}$ ,  $\Delta_{v\%0i}$ ,  $\Delta_{M0i}$  – предельно допустимые значения отклонений уровня скорости относительно скорости и коэффициента распределения нагрузки  $i$ -й секции.

отклонений либо для наборов исходных значений для каждого из них при необходимости более детального анализа [8–11].

На базе экспериментальной установки электропривода БДМ (рис. 2) выполнено математическое моделирование, получены данные эксперимента и проведена оценка результатов моделирования в соответствии с предложенным критерием (1–5).

В структуре обозначены: ПЛК – программируемый логический контроллер, ЧП1-ЧП9 – частотные преобразователи, М1-М9 – электродвигатели, ДС1-ДС9 – датчики скорости, ЛВС – локальная вычислительная сеть. В данной системе секции 1, 3, 5, 6, 7 и 9 управляются по скорости. Секции 2, 4, 8 управляются по моменту нагрузки. На рис. 3 показаны результаты моделирования и экспериментальные данные.

Значения показателей работы многодвигательного привода, полученные в результате моделирования, представлены в табл. 1 и 2, а индикаторы эффективности показаны на компонентных портретах (рис. 4–5).

Анализ результатов комплексной оценки показал, что исследуемая система соответствует требованиям, предъявляемым к многодвигательным ВЭМС, но значение индикаторов эффективности для распределения момента нагрузки восьмой секции ниже порогового значения 0,25, что обуславливает необходимость проработки вопроса улучшения работы данной секции.

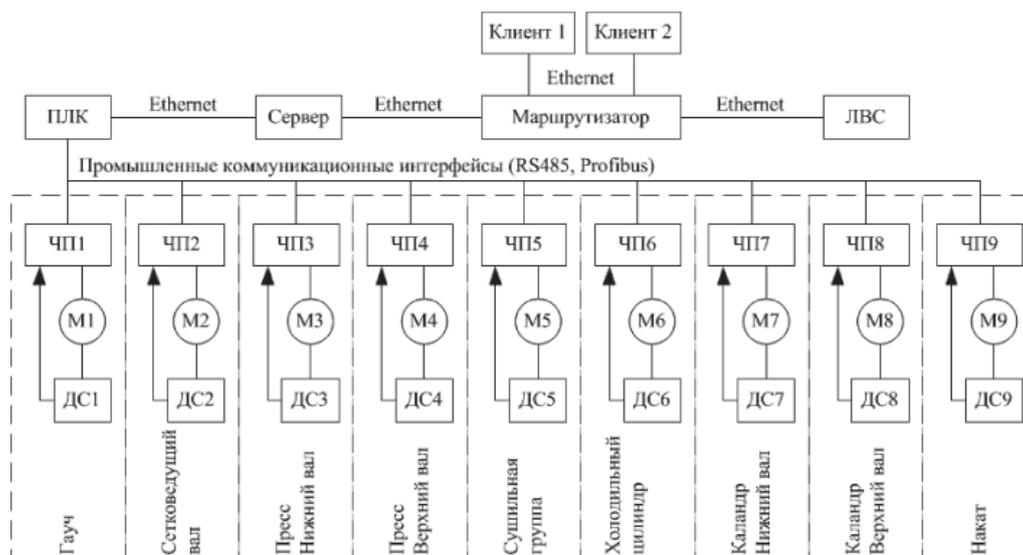


Рис. 2. Структура многодвигательного электропривода экспериментальной установки

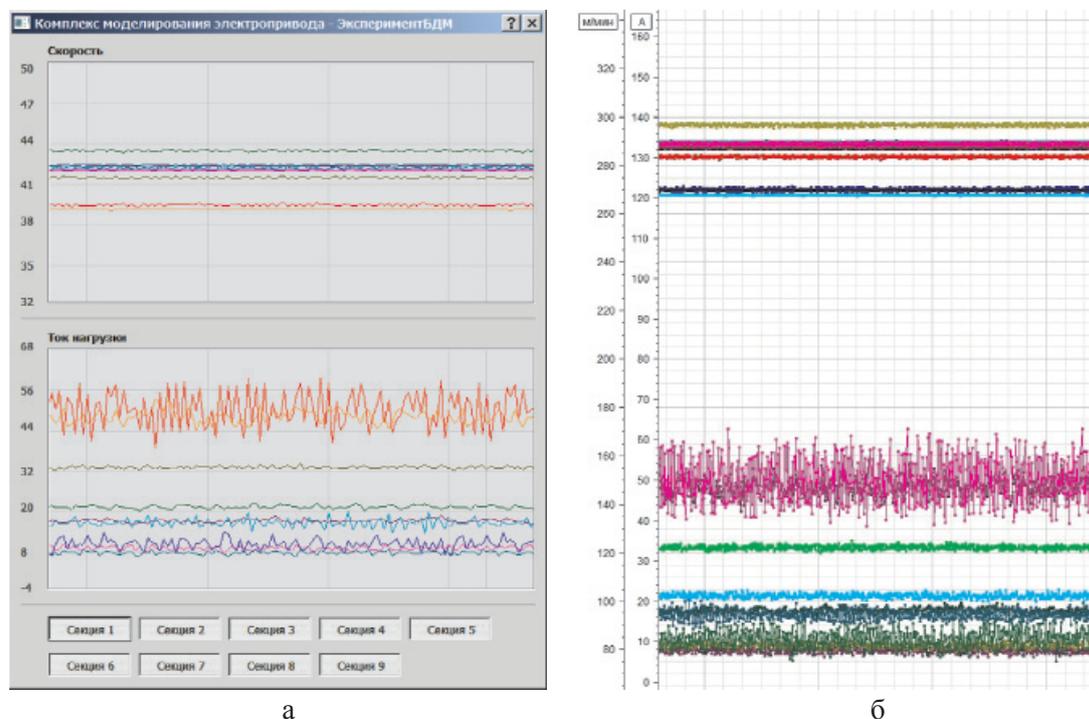


Рис. 3. Исследование многодвигательного электропривода бумагоделательной машины: а – результаты моделирования; б – данные работы экспериментальной установки

Таблица 1

Отклонения уровня скорости и относительной скорости

№ п/п	Секция	Моделирование		Эксперимент	
		$V$	$V\%$	$V$	$V\%$
1	Гауч	0,12	–	0,11	–
3	Пресс Нижний вал	0,13	0,03	0,14	0,04
5	Сушильная группа	0,09	0,04	0,12	0,05
6	Холодильный цилиндр	0,15	0,01	0,10	0,02
7	Каландр Нижний вал	0,11	0,02	0,12	0,01
9	Накат	0,04	0,04	0,06	0,03

## Отклонения по моменту нагрузки

№ п/п	Секция	Отклонение М	
		моделирование	эксперимент
2	Сетководущий вал	0,10	0,11
4	Пресс Верхний вал	0,11	0,09
8	Каландр Верхний вал	0,20	0,21

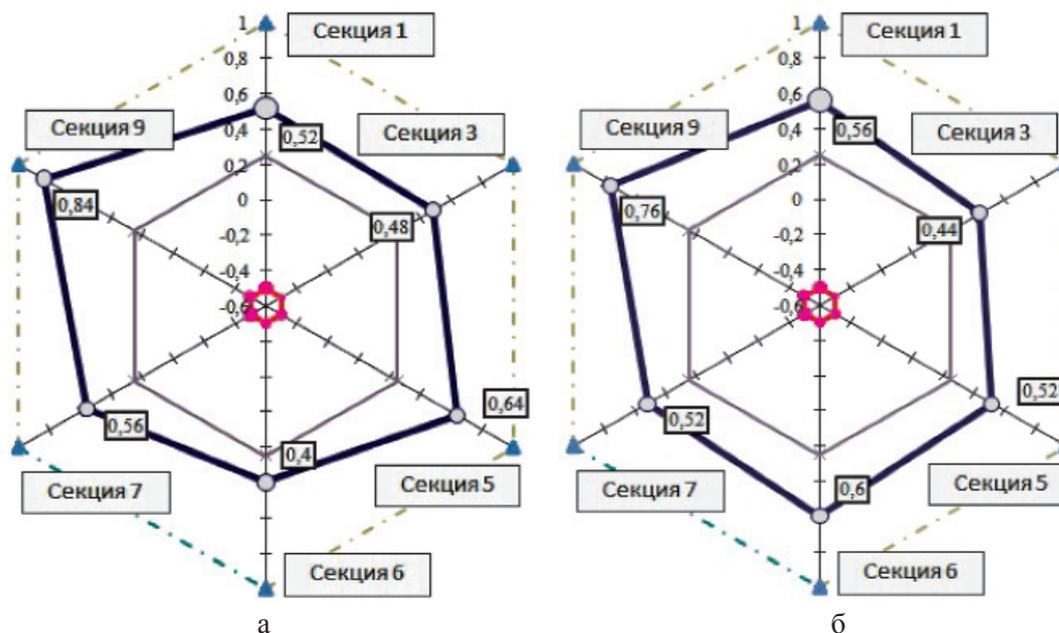


Рис. 4. Компонентный портрет отклонений по скорости для:  
а – результатов моделирования; б – данных эксперимента

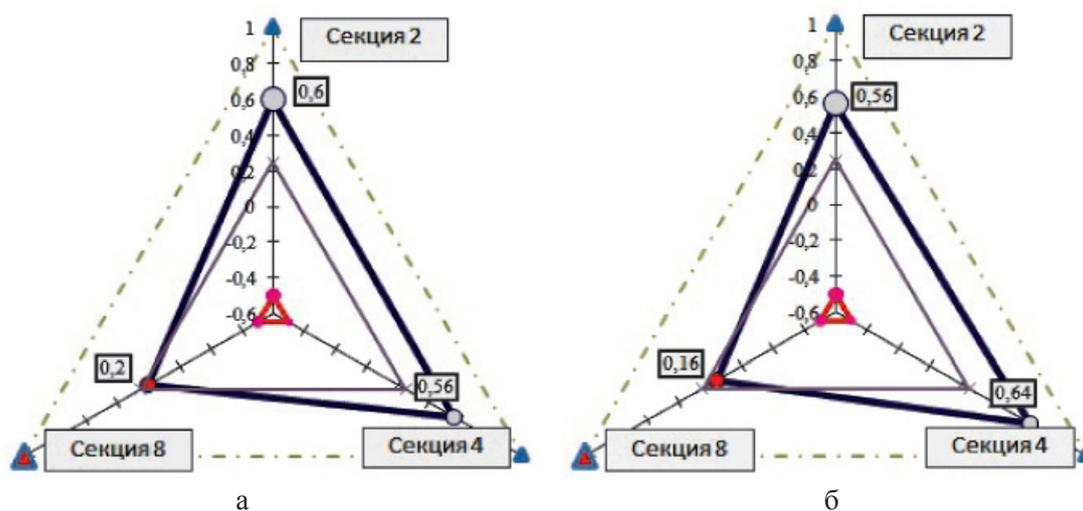


Рис. 5. Компонентный портрет отклонений по распределению момента для:  
а – результатов моделирования; б – данных эксперимента

Предложенный комплексный критерий позволяет оценить эффективность работы многодвигательной ВЭМС в едином пространстве энергетических и техно-

логических параметров. Проведение сравнительного анализа многодвигательных электроприводов с различными характеристиками вентильных преобразователей,

электромеханических преобразователей и механических взаимодействий с использованием предложенного критерия оценки позволяет повысить эффективность исследования и математического моделирования многодвигательного привода БДМ и упрощает формулировку рекомендаций при создании и модернизации подобных систем.

### Список литературы

1. Прошин И.А., Вольников М.И., Салмов Е.Н. Алгоритм комбинированного управления и метод математического моделирования асинхронного электропривода // Нива поволжья. – 2014. – № 4(33) – С. 102–109.
2. Прошин И.А., Прошин Д.И., Сюлин П.В. Принципы генерализации в формировании системы информационных индикаторов экодинамики // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 01 (17). – С. 215–219.
3. Прошина Р.Д., Прошина Е.С., Салмов Е.Н. Интегрированный комплекс компьютерно-имитационного моделирования электромеханических систем // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 12(16). – С. 95–101.
4. Прошин И.А., Прошина Р.Д., Долгов Г.Г. Математическое моделирование и компонентный портрет в оценке оборудования в едином пространстве состояний // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 05 (27). – С. 260–266.
5. Прошин И.А., Прошина Р.Д., Сюлин П.В. Индикаторы и компонентный портрет в оценке качества изготовленных из отходов гальванического производства красок // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 05 (21). – С. 211–219.
6. Прошин И.А., Салмов Е.Н. Метод и алгоритм моделирования непосредственного преобразователя электрической энергии // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL: [www.science-education.ru/121-18543](http://www.science-education.ru/121-18543) (дата обращения: 17.04.2015).
7. Прошин И.А., Салмов Е.Н. Численный метод моделирования выходного напряжения вентильного преобразователя с широтно-импульсной модуляцией // Фундаментальные исследования. 2015. – № 9 (1). – С. 56–62.
8. Прошин И.А., Салмов Е.Н., Кузнецов Д.А. Математическое моделирование системы электропривода роликоопор // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 05(27). – С. 285–293.
9. Прошин И.А., Салмов Е.Н., Тимонин Д.В. Методика моделирования многосвязного многосекционного электропривода для производства бумаги // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 05 (27). – С. 272–281.
10. Прошин И.А., Сюлин П.В. Компонентный портрет экологической безопасности // Проблемы региональной экологии. – 2013. – № 6. – С. 151–154.
11. Шестаков В.М. Автоматизированные электроприводы бумаго- и картоноделательных машин // Лесная промышленность. – 1978. – С. 176.

### References

1. Proshin I.A., Volnikov M.I., Salmov E.N. Algoritm kombinirovannogo upravlenija i metod matematicheskogo modelirovanija asinhronnogo jelektroprivoda // Niva povol-zhja. 2014 no. 4(33) pp. 102–109.
2. Proshin I.A., Proshin D.I., Sjuln P.V. Principy generalizacii v formirovanii sistemy informacionnyh indikatorov jekodinamiki // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus. 2014. no. 01 (17). pp. 215–219.
3. Proshina R.D., Proshina E.S., Salmov E.N. Integrirovannyj kompleks kompjuterno-imitacionnogo modelirovanija jelektromehaničeskich sistem // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus. 2013. no. 12(16). pp. 95–101.
4. Proshin I.A., Proshina R.D., Dolgov G.G. Matematicheskoe modelirovanie i komponentnyj portret v ocenke oborudovanija v edinom prostranstve sostojanij // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus. 2015. no. 05 (27). pp. 260–266.
5. Proshin I.A., Proshina R.D., Sjuln P.V. Indikatory i komponentnyj portret v ocenke kachestva izgotovlennyh iz othodov galvanicheskogo proizvodstva krasok // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus. 2014. no. 05 (21). pp. 211–219.
6. Proshin I.A., Salmov E.N. Metod i algoritm modelirovanija neposredstvennogo pre-obrazovatelja jelektricheskoy jenergii // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2015. no. 1; URL: [www.science-education.ru/121-18543](http://www.science-education.ru/121-18543) (data obrashhenija: 17.04.2015).
7. Proshin I.A., Salmov E.N. Chislennyj metod modelirovanija vyhodnogo naprjazhenija ventilnogo preobrazovatelja s shirotno-impulsnoj moduljaciej // Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 9 (1). pp. 56–62.
8. Proshin I.A., Salmov E.N., Kuznecov D.A. Matematicheskoe modelirovanie sistemy jelektroprivoda roliko-opor // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus. 2015. no. 05(27). pp. 285–293.
9. Proshin I.A., Salmov E.N., Timonin D.V. Metodika modelirovanija mnogovjaznogo mnogosekcionnogo jelektroprivoda dlja proizvodstva bumagi // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus. 2015. no. 05 (27). pp. 272–281.
10. Proshin I.A., Sjuln P.V. Komponentnyj portret jekologičeskoy bezopasnosti // Problemy regionalnoj jekologii. 2013. no. 6. pp. 151–154.
11. Shestakov V.M. Avtomatizirovannye jelektroprivody bumago- i kartonodelatelnyh mashin. «Lesnaja promyshlennost». 1978. pp. 176.