

УДК 004.021

В. Л. Колесников, А. И. Бракович

Белорусский государственный технологический университет

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ С ПОДВИЖНЫМИ АСИМПТОТАМИ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ
СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ**

В статье описывается разработанная методика получения и использования стохастических логистических моделей с подвижными нижней и верхней асимптотами, позволяющих генерировать и количественно оценивать в динамике работу размалывающих машин, включаемых последовательно-параллельно, когда результат размолла в одной машине является началом процесса в последующей. По комбинаторному плану вычислительного эксперимента методом Монте-Карло решена задача минимизации удельных расходов энергии для получения заданного качества размолотой массы. Минимальные удельные расходы энергии увеличиваются при получении волокнистой массы с длинными волокнами и высокой степенью помола. Для получения и визуализации стохастических моделей использовались авторские программные средства: Complex, Model Builder v3, а также математический пакет MathCAD.

Ключевые слова: стохастические логистические модели, методика, программное средство, вычислительный эксперимент, метод Монте-Карло.

V. L. Kolesnikov, A. I. Brakovich

Belarusian State Technological University

**PROBABILISTIC MODELS WITH MOBILE ASYMPOTES
FOR OPTIMIZATION OF SYSTEMS WITH SERIES-PARALLEL SYSTEMS
CONNECTION OF THE ELEMENTS**

The article describes the developed technique for obtaining and using stochastic logistic models with moving lower and upper asymptotes that allow to generate and to quantify in dynamics the operation of grinding machines that are switched on in series-parallel, when the result of grinding in one machine is the beginning of the process in the following machine. According to the combinatorial plan of the computational experiment, the Monte Carlo method solves the problem of minimizing the specific energy expenditure for obtaining a given quality of the ground mass. The minimum specific energy consumption increases with the production of pulp with long fibers and a high degree of grinding. To obtain and visualize stochastic models, the author's software tools were used: Complex, Model Builder v3, and the mathematical package MathCAD.

Key words: stochastic logistic models, methodology, software, computing experiment, Monte Carlo method.

Введение. При организации производства на современных предприятиях со сложной структурой материальных потоков, например на бумажных фабриках, процесс размолла осуществляется на последовательно-параллельно соединенных размалывающих машинах. Причем нагрузки на двигатели мельниц, как правило, устанавливают «вслепую», руководствуясь накопленным опытом и интуицией. Поэтому между оптимальными и реальными затратами электроэнергии на размол существует значительный интервал, который возможно сократить путем оптимизации условий проведения процесса.

Основная часть. Если бы размол осуществлялся в одну ступень, то для достижения конечных результатов на данном размалывающем оборудовании его продолжительность определялась бы установкой соответствующей нагрузки на двигатель и дросселированием массы на выходе.

При последовательном соединении нескольких машин заданные показатели качества размолотой массы будут складываться из времени пребывания суспензии в зоне размолла на каждой мельнице. Поскольку от дросселирования зависит производительность потока, то количество машин, объединяемых в батарею, определяется заданным объемом производства конечной продукции.

Схема потоков и текущие изменения параметров размалываемой массы представлены на рис. 1.

Для математического описания процессов, происходящих в батарее машин, необходимо разработать информационную сеть для проведения эксперимента на одной машине так, чтобы на ней воспроизводились условия работы всей системы. Своеобразие такого эксперимента заключается в том, что в него необходимо одновременно включать однотипные параметры условий и результатов.

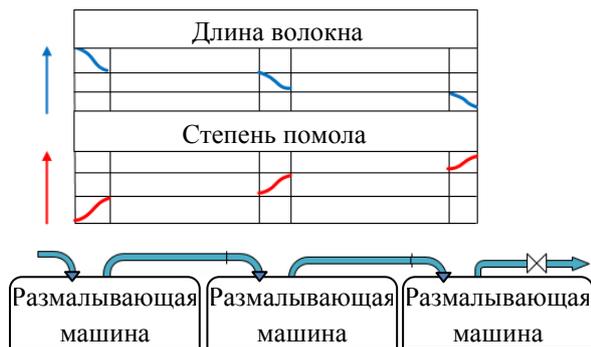


Рис. 1. Характерные изменения параметров качества волокнистой суспензии при последовательном соединении размалывающих машин

Обычно качество размолотой массы оценивается двумя функциями степени помола (FG) и длины волокна (FL) в зависимости от времени размола (T) и нагрузки на двигатель машины (W). В этом эксперименте функции и аргументы связаны с начальными и конечными условиями, протекающими во времени в одной машине при различных нагрузках на двигатель. Ортогональная таблица плана эксперимента получена для пяти факторов с пятью уровнями варьирования. Таблично заданные функции, полученные по результатам эксперимента, представлены на рис. 2.

	A	B	C	D	E	F	G
	C концентрация	L начальная	G начальная	T время	W нагрузка	Y1 Степень помола	Y2 Длина волокна
1							
2	3	350	15	2	50	18	345
3	3	200	25	5	150	38	180
4	3	300	35	8	125	42	250
5	3	150	20	10	100	35	106
6	3	250	30	15	75	45	210
7	7	300	20	2	75	25	285
8	7	150	30	5	50	35	140
9	7	250	15	8	150	29	203
10	7	350	25	10	125	34	269
11	7	200	35	15	100	48	164
12	10	250	25	2	100	27	205
13	10	350	35	5	75	42	335
14	10	200	20	8	50	26	195
15	10	300	30	10	150	39	214
16	10	150	15	15	125	22	95
17	15	200	30	2	125	33	185
18	15	300	15	5	100	24	236
19	15	150	25	8	75	29	140
20	15	250	35	10	50	43	231
21	15	350	20	15	150	38	212
22	20	150	35	2	150	40	123
23	20	250	20	5	125	29	200
24	20	350	30	8	100	37	305
25	20	200	15	10	75	22	132
26	20	300	25	15	50	33	282

Рис. 2. Таблично заданные функции по результатам эксперимента

Эксперимент проводился в производственных условиях Сегежского ЦБК. Аналитический вид нелинейных вероятностных полиномиальных моделей получен путем формирования вектор-столбцов псевдофакторов X_{ij} из независимых переменных рис. 2. Для оценки взаимного влияния параметров, линейризации подвергались их парные произведения, а для анализа нелинейности главных управляющих воздействий (времени и нагрузки на двигатели) в модель введены квадратические зависимости. На рис. 3 показана конструкция модели степени помола с рассчитанными значениями коэффициентов полинома.

Подобные результаты были получены для модели длины волокна.

Общий вид моделей, линейризованных с помощью преобразующих соответствий (1) и (2), показан на рис. 4:

$$YG = FG(C, L, G, T, W); \tag{1}$$

$$YL = FL(C, L, G, T, W). \tag{2}$$

Условия работы одной машины в батарее определяются закрепленным набором значений концентрации массы C , начальных значений степени помола G и начальных значений длины волокна L , а эффект размола определяется значениями установленной нагрузки W на двигатель описываемой машины и времени нахождения массы в зоне размола, которые для этой мельницы можно оперативно менять. При передаче размолотой массы из одной мельницы в другую необходимо осуществлять переприсвоение $L = YL, G = YG$.

Известно, что изменение степени помола происходит по логистическим кривым [1–3]. Для их получения использована линейризация (3), предложенная в работе [4]:

$$YG_i = \ln \left(\frac{|Y_i - AsGn_i|}{|AsGv - Y_i|} \right), \tag{3}$$

где i – порядковый номер машины в батарее; значения Y_i в таблично заданной функции, полученной по результатам эксперимента, заменяются рассчитанными по (3) значениями YG_i ; $AsGv$ – неподвижная верхняя асимптота, представляющая собой максимальное достижимое значение параметра G .

Степень помола описывается полиномиальной логистической моделью с подвижной нижней асимптотой [4]:

$$YG_{i+1} = AsGn_i + \frac{((AsGv - AsGn_i) \cdot \exp(YG))}{1 + \exp(YG)} \tag{4}$$

Визуализация изменений степени помола в батарее трех последовательно соединенных машин приведена на рис. 4.

v	1	1	Роль: псевдофактор	Кэфф. -2,290685
v	x1	C концентрация	Роль: скрытый X	Кэфф. -0,220406
v	x2	L начальная	Роль: скрытый X	Кэфф. 0,011274
v	x3	G начальная	Роль: скрытый X	Кэфф. 0,875158
v	x4	T время	Роль: по оси абсцисс	Кэфф. -4,283482
v	x5	W нагрузка	Роль: по оси ординат	Кэфф. 0,655953
v	y	Y1 Степень помола	Роль: показатель	Кэфф. 0
v	Двоспр	Y2 Длина волокна	Роль: скрытый Y	Кэфф.
v	(x2*x4)	L начальная * T время	Роль: псевдофактор	Кэфф. 0,014431
v	(x2*x5)	L начальная * W нагрузка	Роль: псевдофактор	Кэфф. -0,001405
v	(x3*x4)	G начальная * T время	Роль: псевдофактор	Кэфф. 0,063242
v	(x3*x5)	G начальная * W нагрузка	Роль: псевдофактор	Кэфф. -0,00528
v	(x4*x5)	T время * W нагрузка	Роль: псевдофактор	Кэфф. 0,013891
v	sq(x4)	Квадрат T время	Роль: псевдофактор	Кэфф. -0,091662
v	sq(x5)	Квадрат W нагрузка	Роль: псевдофактор	Кэфф. -0,0013

Рис. 3. Конструкция модели степени помола в программном средстве Model Builder v3

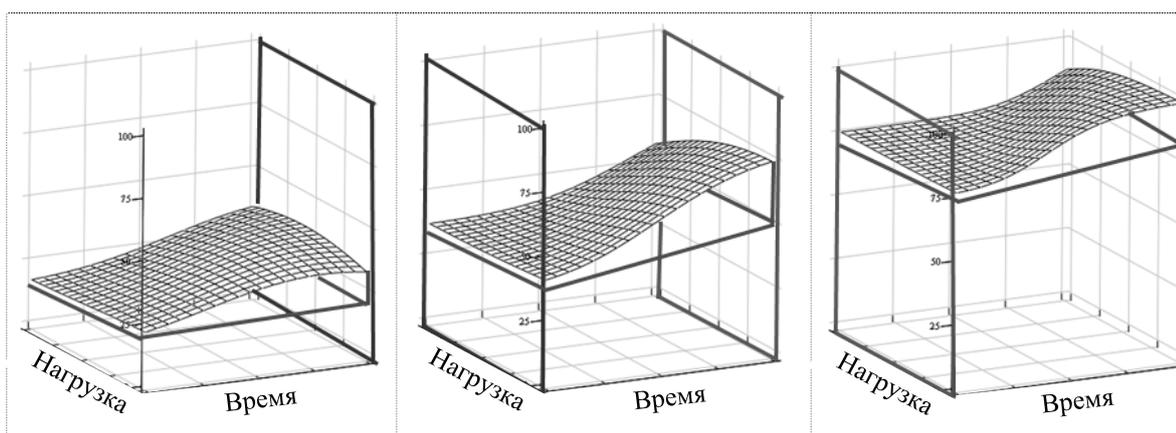


Рис. 4. Графики поверхности отклика функции степени помола с подвижной нижней асимптотой в математическом пакете MathCAD

Уменьшение длины волокна в процессе размола на последовательно соединенных машинах описывается с помощью включения в модель подвижных верхних асимптот. Прием линеаризации модели YL , полученной по результатам эксперимента, осуществляется путем замены значений Y_i , рассчитанных по формуле (5), значениями YL_i . Величина $AsLv_i$ выполняет функцию подвижной верхней асимптоты:

$$YL_i = \ln \left(\frac{|AsLv_i - Y_i|}{|Y_i - AsLn|} \right), \quad (5)$$

где YL_i – значения линеаризованной таблично заданной функции; $AsLv_i$ – подвижная верхняя

асимптота, равная YG_{i+1} предыдущей мельницы; Y_i – значения свойства в таблично заданной функции; $AsLn$ – значение исходной длины волокна неразмолотой массы.

Логистическая модель длины волокна с подвижной верхней асимптотой для батареи последовательно соединенных машин имеет вид

$$YG_{i+1} = AsLv_i - \frac{((AsLv_i - AsLn) \cdot \exp(YL))}{1 + \exp(YL)}. \quad (6)$$

Визуализация изменений длины волокна в батарее трех последовательно соединенных машин приведена на рис. 5.

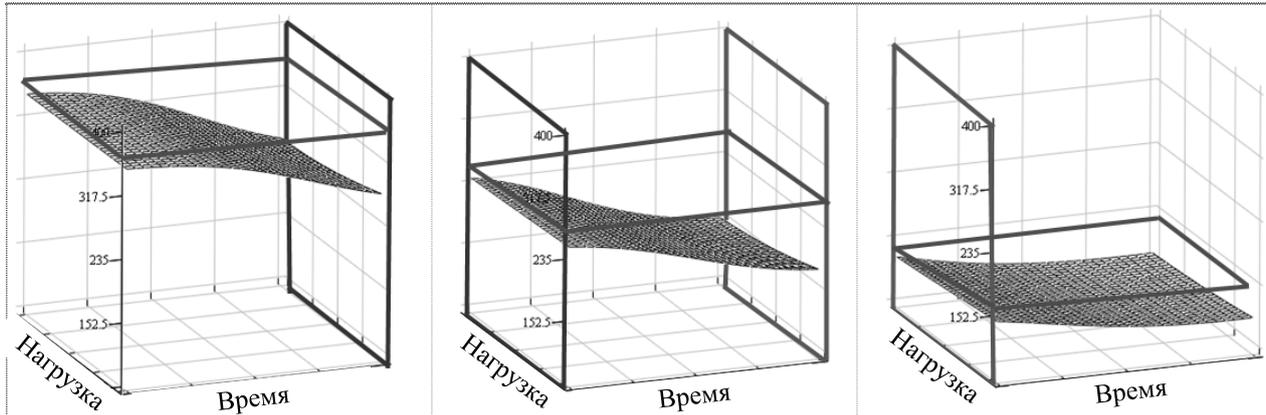


Рис. 5. Графики поверхности отклика функции длины волокна с подвижной верхней асимптотой в математическом пакете MathCAD

Результат оптимизации R= 14394.63 RUD= 41.963 NM= 40						Результат оптимизации R= 21994.86 RUD= 29.196 NM= 60						Результат оптимизации R= 144131.84 RUD= 126.572 NM= 280					
Ступ	Ч.м	Нагру	Конц	Ст.пом	Дл.вол	Ступ	Ч.м	Нагру	Конц	Ст.пом	Дл.вол	Ступ	Ч.м	Нагру	Конц	Ст.пом	Дл.вол
1	4	384.75	10.0	15.1	233.2	1	10	364.36	5.0	15.2	212.1	1	20	333.05	20.0	14.5	248.3
2	4	454.42	10.0	17.0	211.4	2	10	319.72	5.0	16.2	190.3	2	20	488.61	20.0	15.8	244.1
3	4	410.68	10.0	18.8	195.5	3	10	468.23	5.0	18.9	154.2	3	20	479.64	20.0	17.1	239.9
4	4	355.31	10.0	20.2	183.8	4	10	398.54	5.0	20.9	133.9	4	20	482.44	20.0	18.6	235.1
5	4	334.91	10.0	21.5	173.5	5	10	337.60	5.0	22.3	120.6	5	20	395.10	20.0	19.7	231.9
6	4	327.21	10.0	22.8	163.8	6	10	311.02	5.0	23.4	109.9	6	20	423.97	20.0	21.0	227.8
7	4	275.77	10.0	23.7	156.5	Результат оптимизации						7	20	541.34	20.0	23.3	219.4
8	4	366.75	10.0	25.2	145.0	R= 26941.53 RUD= 39.278 NM= 84						8	20	599.36	20.0	26.3	206.7
9	4	338.65	10.0	26.5	135.3	Ступ	Ч.м	Нагру	Конц	Ст.пом	Дл.вол	9	20	536.80	20.0	28.5	196.2
10	4	350.21	10.0	27.7	125.4	1	7	263.27	3.5	14.6	219.2	10	20	544.16	20.0	30.5	184.3
Результат оптимизации						2	7	344.04	3.5	15.9	186.1	11	20	622.28	20.0	32.8	166.2
R= 8923.12 RUD= 33.576 NM= 24						3	7	263.60	3.5	16.7	169.4	12	20	587.28	20.0	34.4	151.4
Ступ	Ч.м	Нагру	Конц	Ст.пом	Дл.вол	4	7	298.84	3.5	17.7	152.5	13	20	623.37	20.0	35.9	135.0
1	2	467.09	5.0	16.0	191.0	5	7	416.16	3.5	19.9	127.4	Результат оптимизации					
2	2	368.13	5.0	17.5	168.3	6	7	259.09	3.5	20.7	117.6	R= 8843.11 RUD= 36.448 NM= 24					
3	2	272.84	5.0	18.4	156.3	7	7	413.92	3.5	22.8	99.3	Ступ	Ч.м	Нагру	Конц	Ст.пом	Дл.вол
4	2	287.00	5.0	19.5	144.5	8	7	363.79	3.5	24.3	87.0	1	4	492.37	3.5	16.3	169.8
5	2	328.57	5.0	20.8	131.2	9	7	331.71	3.5	25.4	77.8	2	4	395.16	3.5	18.2	143.9
6	2	252.20	5.0	21.6	122.9	10	7	350.23	3.5	26.5	69.1	3	4	291.81	3.5	19.2	131.1
7	2	306.07	5.0	22.7	112.7	11	7	288.02	3.5	27.2	63.5	4	4	256.59	3.5	20.0	121.4
8	2	357.98	5.0	24.2	100.7	12	7	256.11	3.5	27.7	59.3	5	4	324.70	3.5	21.3	109.2
9	2	284.98	5.0	25.1	93.1	Результат оптимизации						6	4	450.14	3.5	23.7	90.0
10	2	562.36	5.0	28.4	70.1	R= 40073.77 RUD= 87.969 NM= 60						Результат оптимизации					
11	2	459.58	5.0	30.0	58.9	Ступ	Ч.м	Нагру	Конц	Ст.пом	Дл.вол	R= 16084.90 RUD= 89.298 NM= 42					
12	2	514.76	5.0	31.7	48.4	1	10	711.20	20.0	16.5	236.9	Ступ	Ч.м	Нагру	Конц	Ст.пом	Дл.вол
Результат оптимизации						2	10	708.20	20.0	19.7	222.8	1	3	336.71	15.0	14.7	245.1
R= 11990.51 RUD= 54.943 NM= 26						3	10	743.57	20.0	23.8	203.4	2	3	426.03	15.0	15.9	237.2
Ступ	Ч.м	Нагру	Конц	Ст.пом	Дл.вол	4	10	488.52	20.0	25.7	197.3	3	3	328.81	15.0	16.7	232.3
1	2	408.10	3.5	15.6	191.6	5	10	692.64	20.0	29.4	178.1	4	3	490.36	15.0	18.7	220.7
2	2	357.45	3.5	17.0	164.5	6	10	663.25	20.0	32.2	159.8	5	3	522.80	15.0	21.4	206.1
3	2	362.97	3.5	18.6	142.5	Результат оптимизации						6	3	506.73	15.0	24.0	191.7
4	2	395.68	3.5	20.5	121.3	R= 30701.56 RUD= 22.573 NM= 55						7	3	428.44	15.0	25.9	181.3
5	2	467.74	3.5	23.3	97.2	Ступ	Ч.м	Нагру	Конц	Ст.пом	Дл.вол	8	3	325.78	15.0	26.9	175.0
6	2	564.42	3.5	27.0	70.1	1	11	456.79	3.5	16.0	179.5	9	3	336.08	15.0	27.9	168.2
7	2	485.31	3.5	29.0	56.4	2	11	538.99	3.5	19.5	128.3	10	3	373.23	15.0	29.1	160.0
8	2	444.34	3.5	30.3	48.0	3	11	530.16	3.5	23.2	96.3	11	3	254.75	15.0	29.6	155.6
9	2	435.87	3.5	31.4	42.2	4	11	611.32	3.5	27.5	65.7	12	3	327.28	15.0	30.4	149.3
10	2	382.51	3.5	32.1	38.8	5	11	653.79	3.5	31.0	45.3	13	3	396.36	15.0	31.4	140.4
11	2	520.87	3.5	33.4	34.8	6	11	625.05	3.5	31.0	45.5	14	3	308.28	15.0	32.0	135.0

Рис. 6. Вычислительный эксперимент для оптимизации распределения нагрузок на двигатели машин

Оптимизация распределения нагрузок на двигатели машин осуществлялась путем формирования разнообразных вариантов. Генерирование вариантов осуществлялось по методу Монте-Карло.

Исходными данными служили заданные значения производительности потока и качества размолотой массы по степени помола и длине волокна. Результаты оценивались по величине удельного расхода энергии на размол тонны волокна на один градус Шоппер-Ригглера. При проведении вычислительного эксперимента было сформировано и проанализировано 1500 вариантов распределения нагрузок на двигатели машин при различных требуемых значениях показателей качества размолотой массы. Фрагмент результатов вычислительного эксперимента представлен на рис. 6. Последовательность и параллельность включения машин в батарею определялась необходимостью изменения концентрации массы.

Визуализация изменений длины волокна в батарее трех последовательно соединенных машин приведена на рис. 5.

Анализ рис. 6 позволяет сделать некоторые важные обобщения. Приrost степени помола быстрее и дешевле достигается при высоких концентрациях массы. Наоборот, сокращение длины волокна легче осуществляется при низкой концентрации. Отсюда возникает естественный вывод о том, что процесс размола следует организовывать в несколько ступеней, причем сначала нужно обращать внимание на разработку поверхности волокон при высокой концентрации, а затем, на последующих ступенях, добиваться снижения длины волокна на разбавленной массе.

Таким образом, если сокращение времени размола в мельнице путем дросселирования на выходе не позволяет достичь требуемого качества размолотой массы, то приходится в батарею добавлять последовательно несколько дополнительных единиц размалывающего оборудования. Если батарея не обеспечивает требуемой производительности, то в нее следует добавить несколько машин, включив их параллельно.

При опытно-промышленном испытании разработанной методики оказалось, что, заменив органолептическое управление, использующее опыт, квалификацию и интуицию персонала, на оптимизированное распределение нагрузок между двигателями машин, из 118 работающих машин 30 могут быть отключены.

Заключение. Разработана методика получения и использования стохастических логических моделей с подвижными нижней и верхней асимптотами, позволяющих генерировать и количественно оценивать в динамике работу размалывающих машин, включаемых последовательно-параллельно, когда результат размола в одной машине является началом процесса в последующей. По комбинаторному плану вычислительного эксперимента методом Монте-Карло решена задача минимизации удельных расходов энергии для получения заданного качества размолотой массы. Минимальные удельные расходы энергии увеличиваются при получении волокнистой массы с длинными волокнами и высокой степенью помола. Для получения и визуализации стохастических моделей использовались авторские программные средства: Complex, Model Builder v3, а также математический пакет MathCAD.

Литература

1. Колесников В. Л. Математические основы компьютерного моделирования химико-технологических систем. Минск: БГТУ, 2003. 312 с.
2. Kolesnikov V., Urbanovich P., Brakovich A. Modeling and software implementation of fibrous waste disposal processes // *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation – NEET' 2015: proc. of the 9-th Intern. conf. Lublin, 2015*. P. 37.
3. Колесников В. Л., Жарский И. М., Урбанович П. П. Компьютерное моделирование и оптимизация химико-технологических систем. Минск: БГТУ, 2004. 532 с.
4. Колесников В. Л. Системный анализ производственных процессов в полиграфии. Минск: БГТУ, 2011. 360 с.

References

1. Kolesnikov V. L. *Matematicheskie osnovy komp'yuternogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh sistem* [Mathematical fundamentals of computer modeling of chemical-technological systems]. Minsk, BGTU Publ., 2003. 312 p.
2. Kolesnikov V., Urbanovich P., Brakovich A. Modeling and software implementation of fibrous waste disposal processes. *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation – NEET' 2015: proc. of the 9-th Intern. conf. Lublin, 2015*, p. 37.
3. Kolesnikov V. L., Zharskiy I. M., Urbanovich P. P. *Komp'yuternoe modelirovanie i optimizatsiya khimiko-tekhnologicheskikh sistem* [Computer simulation and optimization of chemical processes: manual for universities]. Minsk, BGTU Publ., 2004. 532 p.

4. Kolesnikov V. L. *Sistemnyy analiz proizvodstvennykh protsessov v poligrafii* [System analysis of industrial processes in polygraphy]. Minsk, BGTU Publ., 2011. 360 p.

Информация об авторах

Колесников Виталий Леонидович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vityakolesnikov@mail.ru

Бракович Андрей Игоревич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: brakovich@yandex.ru

Information about the authors

Kolesnikov Vitaliy Leonidovich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vityakolesnikov@mail.ru

Brakovich Andrey Igorevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: brakovich@yandex.ru

Поступила 15.05.2018