

DOI: 10.12731/2070-7568-2020-1-184-198

УДК 004.94

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СКВОЗНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Тюльпинова Н.В.

Компьютерное моделирование в современных условиях становится основным инструментом повышения эффективности бизнес-процессов благодаря его способности имитировать поведение реальных систем. Результативность такого моделирования зависит не только от структуры компьютерной модели – не менее важным является планирование, проведение и обработка имитационных экспериментов, так как отсутствие научно обоснованной программы вычислительного эксперимента может привести к получению некорректных результатов моделирования, расходящихся с реальностью. Однако, разработчики программного обеспечения для бизнес-симуляции не уделяют должного внимания этому вопросу: обзор функциональных возможностей инструментальных средств, ориентированных на моделирование, имитацию и анализ бизнес-процессов, показывает, что в настоящее время отсутствуют прикладные программные пакеты, реализующие сквозную автоматизацию цикла «планирование – симуляция – обработка результатов».

***Цель** – разработка программного обеспечения, автоматизирующего и интегрирующего все этапы цикла имитационного моделирования бизнес-процессов.*

***Метод или методология проведения работы:** математическая теория планирования экспериментов.*

***Результаты:** программный комплекс и алгоритм проведения бизнес-симуляции в автоматическом режиме.*

***Область применения результатов:** менеджмент (финансовый, стратегический, антикризисный, инвестиционный, инновационный, риск-менеджмент).*

Ключевые слова: имитационное моделирование; планирование экспериментов; бизнес-процесс.

SOFTWARE PACKAGE FOR END-TO-END AUTOMATION SIMULATION OF BUSINESS PROCESSES

Tyulpinova N. V.

In the modern conditions computer simulation becomes an essential tool improving the efficiency of business processes, due its ability to mimic the behavior of the real systems. The effectiveness of the simulation depends not only on the model design – planning, implementation and processing of simulation experiments are equally important, because the absence of scientifically based program for the computational experiment causes incorrect results, disagreement to reality. However, developers of the business-simulation software do not pay due attention to this aspect: the overview of the functional of applications for modeling, simulation and analysis of business processes shows, that nowadays there are no applied software packages, which accomplish end-to-end automation for cycle «planning – simulation – processing».

Purpose – development the software for automation and integration of the whole simulation cycle of business processes.

Method or methodology of the work: mathematical methods for design of experiments.

Results: the software package and the algorithm for business simulations by automatic way.

Practical implications: management (financial, strategic, crisis, investment, innovative, risk).

Keywords: simulation modeling; design of experiments; business process.

Выявление и всестороннее исследование зависимостей и взаимосвязей между объективно существующими явлениями бизнес-процессов является чрезвычайно важным, так как даёт возможность

раскрыть механизм причинно-следственных отношений между происходящими событиями. При этом вербальное описание этих объективно существующих зависимостей и взаимосвязей весьма не информативно, так как на практике требуется количественное описание тесноты причинно-следственных связей и формы влияний. Для исследования интенсивности, вида и формы причинных влияний незаменимым является имитационное моделирование в сочетании с планированием экспериментов. В приложении к бизнес-процессам – это тот инструмент, который позволяет вскрыть сложные комплексы причин и следствий, сформировать векторы совершенствования существующих бизнес-практик, виртуально протестировать новые идеи, после чего принять обоснованное бизнес-решение. Выявление количественных соотношений в виде математических зависимостей позволяет лучше понять природу исследуемого явления, что в свою очередь открывает возможность целенаправленно воздействовать на выявленные факторы, вмешиваться в соответствующий бизнес-процесс с целью получения требуемых результатов.

Компьютерное моделирование в настоящее время становится основным инструментом повышения эффективности бизнес-процессов благодаря его способности имитировать поведение реальных систем. Однако при его практическом применении возникает далеко не тривиальный вопрос: какие именно и в каком количестве конфигурации бизнес-процессов следует смоделировать, чтобы получить требуемую информацию, поскольку если последовательность имитационных прогонов выполняется бессистемно (т.е. наугад проверяется ряд альтернативных конфигураций и наблюдается, что при них происходит), то это ведёт к получению случайных, не объективных и не достоверных результатов. Более того, если на исследуемый бизнес-процесс в действительности воздействует не один, а множество факторов и межфакторных взаимодействий с различной степенью и интенсивностью влияния, то не спланированная на научной основе серия имитационных экспериментов в лучшем случае всего лишь не позволит выявить указанное воздействие, а в худшем – приведёт к получению некорректных ре-

зультатов моделирования, расходящихся с реальностью. Не менее важным в имитационном моделировании бизнес-процессов является и тот факт, что информативный результат должен быть получен при наименьшем объеме затрачиваемых вычислительных ресурсов и минимальном объеме машинного (процессорного) времени. Для решения обозначенных проблем в основу имитационного моделирования должна быть положена математическая теория планирования экспериментов [11–15], которая сделает процесс симуляции целенаправленным и организованным, что существенно повысит как надежность получаемых результатов, так и эффективность имитационных экспериментов, при этом совокупность операций планирования, выполнения и обработки результатов имитационных экспериментов должна быть полностью интегрирована и переведена в автоматический режим, а исследователь-пользователь (например, риск-менеджер, финансовый менеджер, инвестиционный менеджер, системный аналитик и др.), в зависимости от заданных им исследуемых факторов, должен оперативно получать результат моделирования в виде математической зависимости, описывающей исследуемый бизнес-процесс с целью его последующей оптимизации. Обзор функциональных возможностей программных средств для имитационного моделирования [1–10] показывает, что в настоящее время отсутствуют прикладные программные пакеты, реализующие сквозную автоматизацию цикла «планирование – симуляция – обработка результатов». В этой связи, представленные ниже результаты исследований – разработанное алгоритмическое и программное обеспечение для автоматизации и интеграции всех этапов цикла имитационного моделирования – представляют интерес как с научной, так и с практической точки зрения.

Алгоритм проведения вычислительного эксперимента с использованием разработанного программного комплекса включает следующие этапы.

Этап №1. Ввод исходных данных (рис. 1а). На данном этапе необходимо вначале задать число исследуемых факторов и число повторений каждого опыта (в качестве математического ядра

запрограммирован алгоритм двухуровневого полного факторного эксперимента [11–15]); затем нажать кнопку «Ввод» и в появившейся таблице ввести числовые значения уровней и интервала варьирования каждого фактора (число столбцов таблицы динамически изменяется в зависимости от количества исследуемых факторов); после чего нажать кнопку «Сформировать план и выполнить имитационный эксперимент».

Этап №2. Планирование имитационного эксперимента. По итогам этапа №1 автоматически генерируется и записывается в файл рандомизованный сценарий эксперимента (рис. 1б), содержащий последовательность реализации опытов и числовые значения факторов для каждого опыта.

Этап №3. Выполнение имитационного эксперимента. Файл, сформированный по итогам этапа №2, считывается средой имитационного моделирования, которая в режиме пакетной обработки данных выполняет пакет заданий файла, т.е. автоматически реализует серию имитационных экспериментов в порядке, заданном файлом этапа №2 (формат этого файла поддерживается подавляющим большинством современных систем имитационного моделирования). В процессе реализации этапа №3 последовательно, в автоматическом режиме, формируется файл результатов серии экспериментов (рис. 1в).

Этап №4. Представление результатов в соответствии с основными положениями теории планирования эксперимента (рис. 1г): табличная систематизация содержимого файлов сценария и результатов серии экспериментов. После нажатия кнопки «Обработать результаты имитационного эксперимента», запускается процедура автоматической статистической обработки результатов эксперимента, включающая в себя этапы №5, №6, №7, №8 (на каждом из этих этапов система запрашивает у пользователя требуемый уровень статистической значимости).

Этап №5. Проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена (рис. 2а), в ходе которой рассчитываются следующие показатели: 1) среднее значение исследуемого параметра по реализации

а) ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Число факторов 4 Число повторений 3 ВВОД

ФАКТОРЫ	X1	X2	X3	X4
ОСНОВНОЙ УРОВЕНЬ	0,750	3,000	1575,000	1450,000
ИНТЕРВАЛ ВАРЬИРОВАНИЯ	0,250	0,500	25,000	40,000
ВЕРХНИЙ УРОВЕНЬ	1,000	3,500	1600,000	1500,000
НИЖНИЙ УРОВЕНЬ	0,500	2,500	1550,000	1400,000

СФОРМИРОВАТЬ ПЛАН И ВЫПОЛНИТЬ ИМИТАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

б)

test: 1 (10) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000	test: 13 (11) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000	test: 25 (2) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000	test: 37 (11) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000
test: 2 (14) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1550.000 X4: 1400.000	test: 14 (12) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000	test: 26 (11) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000	test: 38 (7) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1550.000 X4: 1500.000
test: 3 (4) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000	test: 15 (5) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1550.000 X4: 1500.000	test: 27 (6) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1550.000 X4: 1500.000	test: 39 (15) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1550.000 X4: 1400.000
test: 4 (3) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000	test: 16 (1) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000	test: 28 (5) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1500.000 X4: 1500.000	test: 40 (8) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1500.000 X4: 1500.000
test: 5 (7) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1550.000 X4: 1500.000	test: 17 (16) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1550.000 X4: 1400.000	test: 29 (8) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1500.000 X4: 1500.000	test: 41 (5) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1500.000 X4: 1500.000
test: 6 (8) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1550.000 X4: 1500.000	test: 18 (7) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1550.000 X4: 1500.000	test: 30 (10) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000	test: 42 (12) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000
test: 7 (2) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000	test: 19 (15) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1550.000 X4: 1400.000	test: 31 (12) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000	test: 43 (14) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1550.000 X4: 1400.000
test: 8 (9) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000	test: 20 (9) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000	test: 32 (4) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000	test: 44 (3) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000
test: 9 (15) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1550.000 X4: 1400.000	test: 21 (1) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000	test: 33 (2) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000	test: 45 (4) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000
test: 10 (13) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1550.000 X4: 1400.000	test: 22 (14) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1550.000 X4: 1400.000	test: 34 (13) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1550.000 X4: 1400.000	test: 46 (6) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1550.000 X4: 1500.000
test: 11 (16) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1500.000 X4: 1400.000	test: 23 (3) X1: 1.000 X2: 2.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000	test: 35 (10) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000	test: 47 (16) X1: 0.500 X2: 2.500 X3: 1500.000 X4: 1400.000
test: 12 (6) X1: 0.500 X2: 3.500 X3: 1500.000 X4: 1500.000	test: 24 (13) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1550.000 X4: 1400.000	test: 36 (1) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1500.000	test: 48 (9) X1: 1.000 X2: 3.500 X3: 1600.000 X4: 1400.000

Рис. 1. Планирование и выполнение имитационного эксперимента (начало)

B)

result: 1(10) Y: 655	result: 13(11) Y: 385	result: 25(2) Y: 810	result: 37(11) Y: 365
result: 2(14) Y: 635	result: 14(12) Y: 350	result: 26(11) Y: 390	result: 38(7) Y: 600
result: 3(4) Y: 565	result: 15(5) Y: 895	result: 27(6) Y: 745	result: 39(15) Y: 295
result: 4(3) Y: 640	result: 16(1) Y: 990	result: 28(5) Y: 875	result: 40(8) Y: 485
result: 5(7) Y: 610	result: 17(16) Y: 320	result: 29(8) Y: 295	result: 41(5) Y: 880
result: 6(8) Y: 500	result: 18(7) Y: 590	result: 30(10) Y: 695	result: 42(12) Y: 330
result: 7(2) Y: 785	result: 19(15) Y: 315	result: 31(12) Y: 340	result: 43(14) Y: 610
result: 8(9) Y: 410	result: 20(9) Y: 420	result: 32(4) Y: 545	result: 44(3) Y: 630
result: 9(15) Y: 290	result: 21(1) Y: 960	result: 33(2) Y: 805	result: 45(4) Y: 540
result: 10(13) Y: 405	result: 22(14) Y: 615	result: 34(13) Y: 390	result: 46(6) Y: 740
result: 11(16) Y: 330	result: 23(3) Y: 650	result: 35(10) Y: 690	result: 47(16) Y: 310
result: 12(6) Y: 765	result: 24(13) Y: 375	result: 36(1) Y: 960	result: 48(9) Y: 430

Г)

Номер опыта	Рандомизация				Кодовые значения				Натуральные значения				Результаты		
	1	2	3		X1	X2	X3	X4	x1	x2	x3	x4	Y1	Y2	Y3
1	10	16	2		+1	+1	+1	+1	1,000	3,500	1600,000	1500,000	990	960	960
2	14	7	13		-1	+1	+1	+1	0,500	3,500	1600,000	1500,000	785	810	805
3	4	15	10		+1	-1	+1	+1	1,000	2,500	1600,000	1500,000	640	650	630
4	3	9	1		-1	-1	+1	+1	0,500	2,500	1600,000	1500,000	565	545	540
5	7	1	11		+1	+1	-1	+1	1,000	3,500	1550,000	1500,000	895	875	880
6	8	14	7		-1	+1	-1	+1	0,500	3,500	1550,000	1500,000	765	745	740
7	2	3	15		+1	-1	-1	+1	1,000	2,500	1550,000	1500,000	610	590	600
8	9	13	8		-1	-1	-1	+1	0,500	2,500	1550,000	1500,000	500	515	485
9	15	2	5		+1	+1	+1	-1	1,000	3,500	1600,000	1400,000	410	420	430
10	13	11	12		-1	+1	+1	-1	0,500	3,500	1600,000	1400,000	655	695	690
11	16	6	14		+1	-1	+1	-1	1,000	2,500	1600,000	1400,000	385	390	365
12	6	5	3		-1	-1	+1	-1	0,500	2,500	1600,000	1400,000	350	340	330
13	11	8	4		+1	+1	-1	-1	1,000	3,500	1550,000	1400,000	405	375	390
14	12	10	6		-1	+1	-1	-1	0,500	3,500	1550,000	1400,000	635	615	610
15	5	12	16		+1	-1	-1	-1	1,000	2,500	1550,000	1400,000	290	315	295
16	1	4	9		-1	-1	-1	-1	0,500	2,500	1550,000	1400,000	330	320	310

ОБРАБОТАТЬ РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Окончание рис. 1.

серии параллельных опытов; 2) дисперсии отклонений исследуемого параметра от среднего значения; 3) сумма всех дисперсий; 4) максимальная дисперсия; 5) расчетное значение критерия Кохрена как отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий; 6) табличное значение критерия Кохрена, соответствующее числу степеней свободы максимальной дисперсии и числу степеней свободы суммы всех дисперсий при заданном уровне значимости. Итогом данного этапа яв-

ляется вывод об однородности или неоднородности дисперсий: если расчетное значение критерия Кохрена оказывается меньше табличного значения этого критерия, то гипотеза об однородности дисперсий и воспроизводимости результатов принимается, а на экране появляется вывод «Дисперсии однородны»; в противном случае, если проверка дает отрицательный результат, – на экране появляется вывод о неоднородности дисперсий и рекомендация относительно увеличения числа параллельных опытов и проведения новой серии экспериментов.

Этап №6. Расчет коэффициентов уравнения регрессии (рис. 2б): каждый коэффициент представляет собой алгебраическую сумму произведений двух столбцов: фактора (или межфакторного взаимодействия) в кодовых обозначениях и среднего значения исследуемого параметра по реализации серии параллельных опытов, деленную на число точек в плане эксперимента.

Этап №7. Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента (рис. 2в), в ходе которой рассчитываются следующие показатели: 1) среднее арифметическое всех дисперсий; 2) дисперсия коэффициентов регрессии; 3) среднеквадратическое отклонение дисперсии коэффициентов регрессии; 4) расчетное значение критерия Стьюдента как отношение модуля коэффициента регрессии к среднеквадратическому отклонению дисперсии коэффициента регрессии; 5) табличное значение критерия Стьюдента, соответствующее числу степеней свободы для проверки значимости коэффициентов регрессии при заданном уровне значимости. Итогом данного этапа является вывод о значимости или незначимости коэффициентов регрессии: если расчетное значение критерия Стьюдента оказывается больше табличного значения этого критерия, то коэффициент признается значимым и на экране напротив данного коэффициента появляется вывод «Значим», в противном случае коэффициент считается статистически незначимым, ему соответствует вывод «Нет» (такой коэффициент отбрасывается без пересчета остальных коэффициентов), а если все коэффициенты незначимы, тогда на экране появляется рекомендация относительно увеличения интервалов варьирования факторов и проведения новой серии экспериментов.

ПРОВЕРКА ОДНОРОДНОСТИ ДИСПЕРСИЙ ПО КРИТЕРИЮ КОУНДА					ПРОВЕРКА ЗНАЧИМОСТИ К-НОВ В ПО КРИТЕРИЮ СТЬЮДЕНТА					ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ПО КРИТЕРИЮ ФИШЕРА					
Номер опыта	Результаты эксперимента			Среднее значение	Дисперсия	K-ит	b	t расч.	t табл. 5%	ВЫВОД	№	Ȳ эксп.	Ȳ расч.	Ȳ-Ȳ	Ȳ-Ȳ ²
	Y1	Y2	Y3	S²	S² (Y)										
						180,208	3,754		1,938		1	970,000	959,792	10,208	104,210
1	990	960	960	970,000	300,000	b0	294,929	2,0369	ЗНАЧИМ	2	800,000	793,958	6,042	36,502	
2	785	810	805	800,000	175,000	b1	0,753	2,0369	НЕТ	3	640,000	636,042	3,958	15,668	
3	640	650	630	640,000	100,000	b2	60,749	2,0369	ЗНАЧИМ	4	550,000	561,042	11,042	121,918	
4	565	545	540	550,000	175,000	b3	13,440	2,0369	ЗНАЧИМ	5	883,333	890,625	7,292	53,168	
5	895	875	880	883,333	108,333	b4	72,361	2,0369	ЗНАЧИМ	6	750,000	758,958	8,958	80,252	
6	765	745	740	750,000	175,000	b12	12,795	2,0369	ЗНАЧИМ	7	600,000	601,042	1,042	1,085	
7	610	590	600	600,000	100,000	b13	1,828	2,0369	НЕТ	8	500,000	491,875	8,125	66,016	
8	500	515	485	500,000	225,000	b14	31,073	2,0369	ЗНАЧИМ	9	420,000	421,042	1,042	1,085	
9	410	420	430	420,000	100,000	b23	1,183	2,0369	НЕТ	10	680,000	686,042	6,042	36,502	
10	655	695	690	680,000	475,000	b24	11,075	2,0369	ЗНАЧИМ	11	380,000	373,125	6,875	47,266	
11	385	390	365	380,000	175,000	b34	1,183	2,0369	НЕТ	12	340,000	348,958	8,958	80,252	
12	350	340	330	340,000	100,000	b123	1,398	2,0369	НЕТ	13	390,000	386,042	3,958	15,668	
13	405	375	390	390,000	225,000	b124	20,106	2,0369	ЗНАЧИМ	14	620,000	616,875	3,125	9,766	
14	635	615	610	620,000	175,000	b134	0,108	2,0369	НЕТ	15	300,000	303,958	3,958	15,668	
15	290	315	295	300,000	175,000	b234	1,828	2,0369	НЕТ	16	320,000	313,958	6,042	36,502	
16	330	320	310	320,000	100,000	b1234	4,408	2,0369	ЗНАЧИМ	Табличное значение 5% $F_{табл.}$ 7 Расчетное значение $F_{расч.}$ 2,34 $F_{расч.} < F_{табл.} \Rightarrow$ модель адекватна					
Табличное значение 5% $F_{табл.}$ 7 Расчетное значение $F_{расч.}$ 2,34 $F_{расч.} < F_{табл.} \Rightarrow$ дисперсии однородны															

а)

в)

г)

Номер опыта	факторы					Взаимодействия факторов												Результат Ȳ
	0	1	2	3	4	12	13	14	23	24	34	123	124	134	234	1234		
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	970,000	
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	800,000	
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	640,000	
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	550,000	
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	883,333	
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	750,000	
7	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	600,000	
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	500,000	
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	420,000	
10	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	680,000	
11	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	380,000	
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	340,000	
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	390,000	
14	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	620,000	
15	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	300,000	
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	320,000	
		b0 = 571,458		b1 = 1,458		b2 = 117,708		b3 = 26,042		b4 = 140,208		b12 = -24,792		b13 = 3,542		b14 = 60,208		
		b23 = 2,292		b24 = 21,458		b34 = 2,292		b123 = -2,708		b124 = 38,958		b134 = -0,208		b234 = 3,542		b1234 = 8,542		

б)

Рис. 2. Статистическая обработка результатов эксперимента

Этап №8. Проверка адекватности модели по критерию Фишера (рис. 2г), в ходе которой рассчитываются следующие показатели: 1) экспериментальное значение исследуемого параметра; 2) рас-

четное значение исследуемого параметра по уравнению регрессии; 3) модуль и квадрат разности между экспериментальным и расчетным значениями; 4) сумма полученных квадратов разностей; 5) дисперсия адекватности; 6) расчетное значение критерия Фишера как отношение дисперсии адекватности к дисперсии исследуемого параметра; 7) табличное значение критерия Фишера, соответствующее числу степеней свободы для дисперсии адекватности и числу степеней свободы для дисперсии исследуемого параметра при заданном уровне значимости. Итогом данного этапа является вывод об адекватности или неадекватности модели: если расчетное значение критерия Фишера оказывается меньше табличного значения этого критерия, то гипотеза адекватности модели принимается, а на экране появляется вывод «Модель адекватна»; в противном случае, если проверка дает отрицательный результат, – на экране появляется вывод о неадекватности модели и рекомендация относительно либо увеличения интервалов варьирования факторов; либо выделения и фиксации на определенном уровне фактора, порождающего неадекватность; либо преобразования факторов.

а)
$$y = (571,458) + (117,708)x_2 + (26,042)x_3 + (140,208)x_4 + (-24,792)x_1x_2 + (60,208)x_1x_4 + (21,458)x_2x_4 + (38,958)x_1x_2x_4 + (8,542)x_1x_2x_3x_4$$

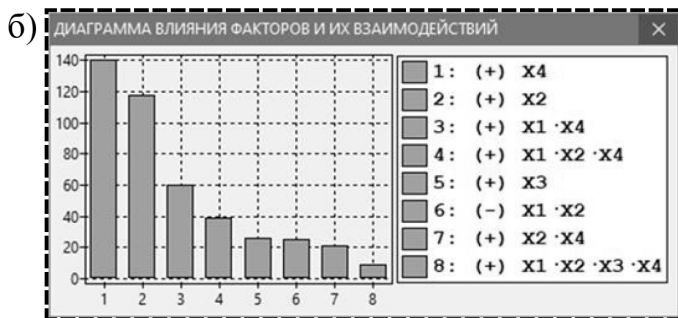


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования

Этап №9. Автоматическая генерация результатов: 1) полученная по итогам моделирования регрессионная зависимость, описывающая исследуемый бизнес-процесс (рис. 3а); 2) диаграмма влияния

факторов и межфакторных взаимодействий на параметры анализируемого бизнес-процесса (рис. 3б).

Разработанный программный комплекс полностью автоматизирует весь цикл имитационного моделирования от планирования и симуляции до обработки результатов эксперимента: пользователю достаточно лишь ввести исходные данные, после чего в автоматическом режиме (без участия человека) осуществляется планирование, проведение и обработка серии имитационных экспериментов, что обеспечивает возможность: во-первых, полностью исключить интуитивный подход в имитационном моделировании, заменив его научно обоснованной программой проведения экспериментального исследования, включающей объективную оценку результатов эксперимента на всех этапах исследования; во-вторых, оперативно и при минимально необходимом объеме затрачиваемых ресурсов получать многочисленные регрессионные модели, ориентированные на различные совокупности входных факторов и объективно и всесторонне отражающие специфику исследуемых бизнес-процессов в контексте разнообразных аспектов; в-третьих, полученные математические зависимости могут быть использованы как для оптимизации существующих бизнес-процессов, так и для тестирования новых, ещё не опробованных на практике, бизнес-решений.

Список литературы

1. Алексеев А.О., Бутко А.О., Колесников Д.А. Оптимизация бизнес-процессов при помощи имитационного моделирования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 1 (173). С. 13–19.
2. Большаков И.Н. Имитационное моделирование бизнес-процессов и экономических систем // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2018. Т. 2. С. 715–718.
3. Кирчева Е.М., Осенний В.В., Манютина С.Ю. Современные методы анализа бизнес-процессов с применением имитационного моделирования // Энигма. 2019. Т. 1. № 16-1. С. 109–122.
4. Круликовский А.П., Антропова А.А. Имитационное моделирование

- бизнес-процессов // Труды XIV Международной научно-практической конференции «Теория и практика экономики и предпринимательства». Симферополь, 2017. С. 191–192.
5. Михайлова С.Е., Сасева А.В., Пучков А.Ю. Обзор программных средств имитационного моделирования экономических процессов // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Кластерные инициативы в формировании прогрессивной структуры национальной экономики». Курск, 2015. С. 230–232.
 6. Рассказов В.А., Касперский Ю.С. Инструментальные средства имитационного моделирования бизнес-процессов // Материалы X Международной научно-практической конференции «Государство и бизнес. Современные проблемы экономики». СПб., 2018. С. 132–137.
 7. Сиротин Д.В. Моделирование развития экономики региона в условиях Индустрии 4.0 // Наука Красноярья. 2019. Т. 8. № 3. С. 98–108.
 8. Скородумов П.В. Имитационное моделирование экономических систем: программные средства и направления их совершенствования // Проблемы развития территории. 2015. № 2 (76). С. 62–72.
 9. Скрипник Д.В., Яхонтова И.М. Современные подходы к имитационному моделированию бизнес-процессов // Сборник материалов VIII международного форума «Информационное общество: современное состояние и перспективы развития». Краснодар, 2017. С. 83–85.
 10. Сытченко Д.Ю., Брежнев А.В. Программное обеспечение имитационного моделирования: языки и предметно-ориентированные программы моделирования // Сборник материалов Всероссийской конференции «Программная инженерия: современные тенденции развития и применения». Курск, 2017. С. 164–169.
 11. Barad M. Design of Experiments (DOE) – A Valuable Multi-Purpose Methodology // Applied Mathematics. 2014. No. 5, pp. 2120–2129.
 12. Durakovic B. Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2017. Vol. 5. No. 3, pp. 421–439.
 13. Grömping U. R Package DoE.base for Factorial Experiments // Journal of Statistical Software. 2018. Vol. 85. Issue 5, pp. 1–41.

14. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. New York, 2013. 684 p.
15. Rüttimann B.G., Wegener K. The Power of DOE: How to Increase Experimental Design Success and Avoid Pitfalls // Journal of Service Science and Management. 2015. No. 8, pp. 250–258.

References

1. Alekseev A.O., Butko A.O., Kolesnikov D.A. Optimizatsiya biznes-protsessov pri pomoshchi imitatsionnogo modelirovaniya [Optimization of business processes using simulation modeling]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*. 2019. No. 1 (173), pp. 13–19.
2. Bol'shakov I.N. Imitatsionnoe modelirovanie biznes-protsessov i ekonomicheskikh system [Simulation modeling of business processes and economic systems]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam*. 2018. Vol. 2, pp. 715–718.
3. Kircheva E.M., Osenniy V.V., Manyutina S.Yu. Sovremennyye metody analiza biznes-protsessov s primeneniem imitatsionnogo modelirovaniya [Modern methods of business process analysis using simulation modeling]. *Enigma*. 2019. Vol. 1. No. 16-1, pp. 109–122.
4. Krulikovskiy A.P., Antropova A.A. Imitatsionnoe modelirovanie biznes-protsessov [Simulation modeling of business processes]. *Trudy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Teoriya i praktika ekonomiki i predprinimatel'stva»* [Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference “Theory and Practice of Economics and Entrepreneurship”. Simferopol', 2017, pp. 191–192.
5. Mikhaylova S.E., Saseva A.V., Puchkov A.Yu. Obzor programmnykh sredstv imitatsionnogo modelirovaniya ekonomicheskikh protsessov [Overview of software tools for simulation modeling of economic processes]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Klasternyye initsiativy v formirovanii progressivnoy struktury natsional'noy ekonomiki»* [Collection of scientific papers of the International scientific-practical conference “Cluster initiatives in the formation of a progressive structure of the national economy”]. Kursk, 2015, pp. 230–232.

6. Rasskazov V.A., Kasperskiy Yu.S. Instrumental'nye sredstva imitatsionnogo modelirovaniya biznes-protsessov [Software tools for simulation modeling of business processes]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Gosudarstvo i biznes. Sovremennye problemy ekonomiki»* [Materials of the X International Scientific and Practical Conference “State and Business. Modern problems of the economy”]. SPb., 2018, pp. 132–137.
7. Sirotin D.V. Modelirovanie razvitiya ekonomiki regiona v usloviyakh Industrii 4.0 [Development modeling of the regional economy in the industry 4.0 conditions]. *Nauka Krasnoyar 'ya*. 2019. Vol. 8. No. 3, pp. 98–108.
8. Skorodumov P.V. Imitatsionnoe modelirovanie ekonomicheskikh sistem: programmnye sredstva i napravleniya ikh sovershenstvovaniya [Simulation modeling of economic systems: software tools and areas of improvement]. *Problemy razvitiya territorii*. 2015. No. 2 (76), pp. 62–72.
9. Skripnik D.V., Yakhontova I.M. Sovremennye podkhody k imitatsion-nomu modelirovaniyu biznes-protsessov [Modern approaches to simulation modeling of business processes]. *Sbornik materialov VIII mezhdunarodnogo foruma «Informatsionnoe obshchestvo: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya»* [Proceedings of the VIII international forum “Information Society: current status and development prospects”]. Krasnodar, 2017, pp. 83–85.
10. Sytchenko D.Yu., Brezhnev A.V. Programmnoe obespechenie imitatsionnogo modelirovaniya: yazyki i predmetno-orientirovannye programmy modeli-rovaniya [Simulation software: languages and object-oriented modeling programs]. *Sbornik materialov Vserossiyskoy konferentsii «Programmnyaya inzheneriya: sovremennye tendentsii razvitiya i primeneniya»* [Proceedings of the All-Russian Conference “Software Engineering: Current Trends of Development and Application”]. Kursk, 2017, pp. 164–169.
11. Barad M. Design of Experiments (DOE) – A Valuable Multi-Purpose Methodology. *Applied Mathematics*. 2014. No. 5, pp. 2120–2129.
12. Durakovic B. Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2017. Vol. 5. No. 3, pp. 421–439.

13. Grömping U. R Package DoE.base for Factorial Experiments. *Journal of Statistical Software*. 2018. Vol. 85. Issue 5, pp. 1–41.
14. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. New York, 2013. 684 p.
15. Rüttimann B.G., Wegener K. The Power of DOE: How to Increase Experimental Design Success and Avoid Pitfalls. *Journal of Service Science and Management*. 2015. No. 8, pp. 250–258.

ДААННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Тюльпинова Нина Владимировна, доцент кафедры «Технология машиностроения», кандидат технических наук, доцент
*Брянский государственный технический университет
бульвар 50 лет Октября, 7, г. Брянск, 241035, Российская Фе-
дерация
ninatulpinova@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHOR

Tyulpinova Nina Vladimirovna, Associate Professor «Manufacturing engineering», Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
*Bryansk State Technical University
7, 50 let Ocyabrya Blvd, Bryansk, 241035, Russian Federation
ninatulpinova@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1485-7238*