

УДК 519.242:519.876.2

# РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МОДЕЛЯМИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ

ЧЕПРУНОВА О. Ю., ЩЕПКИН А. В.

(Москва)

Даются логические основания планирования эксперимента с моделями организационных систем, излагается метод разработки эксперимента.

## 1. Введение

Эксперимент — один из наиболее распространенных методов исследования в естественных науках. Проведение экспериментов с организационными системами для изучения их механизма функционирования требует значительных затрат времени и средств. Ускорить и удешевить эксперимент позволяет проведение эксперимента на моделях организационных систем. Теория эксперимента позволяет еще более уменьшить стоимость и время эксперимента, увеличить точность и надежность результатов.

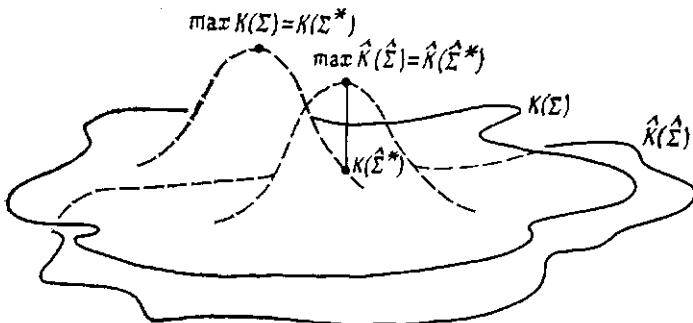


Рис. 1

Эксперименты в исследованиях организационных систем, которые также называются активными системами, отличаются от экспериментов в физике, химии, биологии и т. д., для которых разрабатывались методы теории. В работе в качестве эксперимента рассматриваются деловые игры и имитационное моделирование [1, 2]. Их особенность в том, что одним из значащих факторов является активное поведение людей. Насколько известно, для разработки экспериментов в исследованиях организационных систем теория эксперимента до сих пор не применялась. В работе даны логические основания планирования эксперимента в этой области, изложен метод разработки эксперимента.

## 2. Постановка задачи

Цель развития теории активных систем — совершенствование механизма функционирования. Механизмом функционирования организационной системы называется набор правил (процедур, функций), регламентирующих действия центра и элементов в процессе функционирования [3]. С этой целью осуществляется анализ системы, и на основе результатов анализа синтезируется механизм функционирования, оптимальный по некоторым критериям. Эти критерии — формализованные требования к активной системе, например повышение производительности труда, согласование интересов нижнего уровня с интересами верхнего уровня, сообщение достоверной информации элементами управляющему органу и т. д.

Формально задача совершенствования механизма функционирования ставится следующим образом [3]. 1. Построить математическую модель функционирующей активной системы. При помощи этой модели исследовать действующий механизм функционирования  $\hat{\Sigma}^0 : \hat{\Sigma}^0 = \langle \Phi^0, \hat{\omega}^0, \hat{\pi}^0 \rangle$ , где  $\Phi^0$  — целевая функция системы,  $\hat{\omega}^0$  — система стимулирования,  $\hat{\pi}^0$  — закон планирования. Такая задача называется задачей анализа. После ее решения ставится задача синтеза. 2. При помощи математической модели системы и результатов анализа выбрать наиболее совершенный механизм функционирования модели  $\hat{\Sigma}^*$  из множества возможных механизмов функционирования  $\hat{G}^2$ , удовлетворяющих модели ограничений системы. Искомый механизм функционирования является решением задачи максимизации критерия эффективности функционирования модели  $K(\langle \Phi, \hat{\omega}, \hat{\pi} \rangle)$ :

$$K(\langle \hat{\Phi}, \hat{\omega}, \hat{\pi} \rangle) \xrightarrow{\hat{G}^2} \max.$$

Обозначим механизм функционирования реальной системы  $\Sigma = \langle \Phi, \omega, \pi \rangle$ , в отличие от обозначения механизма функционирования математической модели системы  $\hat{\Sigma}$ . Множество всех возможных механизмов функционирования реальной системы, удовлетворяющих ограничениям, обозначим  $G^2$ . Критерий эффективности реальной системы —  $K(\Sigma)$ . Пусть механизм  $\Sigma^*$  такой, что

$$\Sigma^* = \operatorname{Arg} \max_{G\Sigma} K(\Sigma).$$

Так как математическая модель системы всегда не полностью адекватна реальной системе, то  $\hat{\Sigma}^*$  и  $\Sigma^*$  могут не совпадать. Это проиллюстрировано на рис. 1. Следовательно, прежде чем внедрять механизм функционирования  $\hat{\Sigma}^*$  в реальную систему, необходимо проверить его экспериментально. Внедрение непроверенного механизма функционирования может повлечь такие потери, которые несизмеримы с затратами на разработку и проведение эксперимента.

Экспериментами в исследованиях организационных систем можно назвать имитационное моделирование, деловую игру и промышленный эксперимент. Ниже все эти термины будут употребляться только в смысле эксперимента в организационной системе или над ее моделью.

Промышленным экспериментом является внедрение разработок теории организационных систем на одном предприятии или в одной отрасли промышленности. Как правило, любое внедрение проходит через стадию промышленного эксперимента. Другой вопрос — будет ли постановка такого эксперимента грамотной? В положительном случае из эксперимента можно извлечь намного больше информации и внести, если потребуется, необходимые поправки. В теории эксперимента есть соответствующее направление — адаптационная оптимизация, в которой разработаны соответствующие методы планирования, например метод эволюционного планирования.

Но прежде чем перейти к промышленному эксперименту над организационной системой, необходимо провести эксперимент над моделью организационной системы, который проще, дешевле и менее рискован. Именно разработка экспериментов над моделями организационных систем является предметом статьи.

Деловая игра — это эксперимент над моделью системы, в котором роль активных элементов играют люди.

Для того чтобы дать в эксперименте более или менее надежный результат, необходимо произвести серию испытаний, результат которых статистически оценивается. Но деловые игры, как правило, требуют времени, тем более, что игроки не сразу осваиваются в ситуации. Поэтому набрать необходимую статистику, проводя только деловые игры, практически невозможно.

Однако в деловой игре игроков-людей можно заменить на автоматы с памятью и экспериментировать с имитационной моделью, что позволяет произвести все необходимые испытания. Но па основании только имитационной модели нельзя делать окончательные выводы, так как поведение людей и автоматов в одной и той же ситуации может не совпадать, потому что поведение людей намного сложнее поведения автоматов. Автоматы программируются на основании некоторых гипотез о поведении людей в данной ситуации. Эти гипотезы можно проверить только в деловой игре.

Поэтому деловая игра и имитационное моделирование соединены в один эксперимент, который планируется как единое целое.

В работе описан и проиллюстрирован метод планирования такого эксперимента и обработки данных.

### 3. Разработка эксперимента

Разработка эксперимента под моделью организационной системы начинается с создания такой модели и постановки задачи эксперимента. Например, задача может быть сформулирована так: исследовать зависимость критерия эффективности системы от ее параметров и найти максимум критерия эффективности. Затем выбираются наблюдаемая величина (или отклик) эксперимента  $y$  и варьируемые переменные (или факторы)  $x_1, x_2, \dots, x_p$ . В приведенном примере наблюдаемая величина — критерий эффективности системы.

После этого строится математическая модель эксперимента

$$(1) \quad y = \beta_0 + \sum_{1 \leq i \leq p} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq p} \beta_{ij} x_i x_j + \dots + \beta_{12\dots p} x_1 x_2 \dots x_p,$$

представляющая собой отражение точки факторного пространства  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$  в пространство откликов. В (1)  $\beta_i x_i$  — эффект  $i$ -го фактора,  $\beta_{12\dots p} \prod_i x_i$  — эффект взаимодействия факторов  $x_1, x_2, \dots, x_p$ .

План эксперимента представляет собой набор точек в факторном пространстве, в каждой из которых необходимо измерить отклик. Схематично его можно изобразить в виде табл. 1.

В клетках каждой строки записаны уровни факторов. Числами от 1 до  $N$  обозначены комбинации экспериментальных условий. Как правило, чтобы набрать необходимую статистику, для каждой комбинации экспериментальных условий проводится несколько испытаний.

По факторному плану, который соответствует выбранной математической модели эксперимента, исследуется модель с игроками-автоматами. В результате находится решение задачи эксперимента (например, максимум критерия эффективности системы). Но в исходной задаче нужно было найти это решение при помощи деловой игры, так как деловая игра более адекватна реальной системе, чем имитационная модель. Поэтому необходимо экспериментально подтвердить, что замена деловой игры игрой с автоматами правомерна, т. е. отклик деловой игры совпадает с откликом игры с автоматами или, как говорят в статистике, статистически не отличим, т. е. различие откликов деловой игры и игры с автоматами не больше ошибки эксперимента. Для этого из полного факторного плана выбираются некоторые

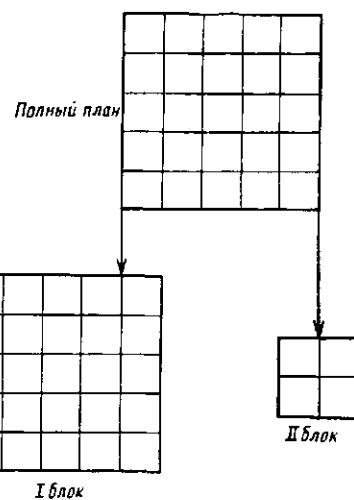


Рис. 2

Таблица 1

	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	...	$x_p$	...	$\prod_{i=1}^p x_i$
1							
⋮							
⋮							
⋮							
$N$							

Таблица 2

	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	...	$x_p$	...	$\prod_{i=1}^p x_i$
$i_1$							
⋮							
⋮							
⋮							
$i_l$							

варианты (т. е. комбинации уровней факторов), в которых проводится деловая игра. Потом отклики деловой игры сравниваются с откликами игры с автоматами в соответствующих вариантах. По сути деловая игра и игра с автоматами являются двумя блоками одного эксперимента, между которыми испытания распределяются не поровну, как обычно в теории эксперимента, а неравномерно, как изображено на рис. 2. Вопрос о правомерности замены деловой игры сводится к вопросу об отсутствии межблокового эффекта, т. е. значимой разницы между средними значениями откликов каждого блока.

Планом деловой игры является случайно выбранная дробная реплика исходного плана. Это может быть реплика объемом  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$  и т. д. от исходного плана, в зависимости от нужной точности деловой игры и возможного числа испытаний. Схематично план деловой игры представлен на табл. 2. Номера вариантов из полного факторного плана, попавших в план деловой игры, обозначены  $i_1$ ,  $i_2$ , ...,  $i_L$ .

В дробной реплике эффекты, представленные отдельными членами в уравнении (1), смешиваются и образуют группы неразличимых эффектов. Обозначим эти группы символом  $z_j$ . Тогда математическая модель эксперимента по плану дробной реплики имеет вид

$$(2) \quad y = \alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \dots + \alpha_{L-1} z_{L-1}.$$

В эксперименте число различимых эффектов равно числу вариантов в плане минус 1. Поэтому число эффектов, которые можно различить в деловой игре, равно  $L-1$ , что намного меньше, чем в имитационном моделировании. Но задача различения эффектов перед деловой игрой не ста-

Таблица 3

	$x_1$	$x_2$	$\hat{x}_1 x_2$	...	$x_p$	...	$\hat{x}_1 \prod_{i=2}^p x_i$
$i_1$							
$\vdots$							
$i_L$							

вится, так как она решена с помощью имитационного моделирования. Необходимо только сравнить отклики эксперимента  $y$  и  $\hat{y}$ , полученные соответственно в деловой игре и имитационном эксперименте.

Из плана имитационного эксперимента выбираются те же варианты, что составляют план деловой игры, и заполняется табл. 3. Здесь номером 1 обозначен фактор, связанный с активным поведением. В деловой игре он обозначается  $x_1$ , а в имитационном эксперименте  $\hat{x}_1$ . Математическая модель эксперимента, соответствующая плану в табл. 3, имеет вид

$$(3) \quad \hat{y} = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 z_1 + \hat{\alpha}_2 z_2 + \dots + \hat{\alpha}_{L-1} z_{L-1}.$$

Пусть обозначено  $k$  — номер испытания в варианте,  $K$  — число испытаний в варианте,  $i_l$  — номер варианта,  $L$  — число вариантов,  $y_{i_l}^k$  — отклик в  $k$ -м испытании варианта  $i_l$  в I блоке,  $\hat{y}_{i_l}^k$  — отклик в  $k$ -м испытании варианта  $i_l$  во II блоке,  $r$  — число степеней свободы для ошибки эксперимента. Статистическое сравнение откликов двух блоков, изображенных в табл. 2 и 3, проводится методом дисперсионного анализа.

1. Подсчитываются средние откликов: общее среднее

$$\bar{y}_{\text{общ}} = \frac{1}{2LK} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (y_{i_l}^k + \hat{y}_{i_l}^k),$$

средние по блокам

$$\bar{y}_{\text{I бл}} = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L y_{i_l}^k, \quad \bar{y}_{\text{II бл}} = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \hat{y}_{i_l}^k,$$

средние по вариантам

$$y_{\text{вар}} = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K (y_{i_l}^k + \hat{y}_{i_l}^k).$$

2. Подсчитываются суммы квадратов отклонений от общего среднего.

Для каждого испытания  $s_{\text{общ}}^2 = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (2\bar{y} - (y_{i_l}^k + \hat{y}_{i_l}^k))^2$ , для каждого

блока  $s_{\text{бл}}^2 = LK(2\bar{y} - \bar{y}_{\text{I бл}} - \bar{y}_{\text{II бл}})^2$ , для каждого варианта  $s_{\text{вар}}^2 = 2K \sum_{l=1}^L (\bar{y} -$

$-\bar{y}_{\text{вар}}_1$ ). Сумма квадратов ошибки эксперимента подсчитывается из основного уравнения дисперсионного анализа  $s_{\text{ш}}^2 = s_{\text{общ}}^2 - s_{\text{бл}}^2 - s_{\text{вар}}^2$ , где количество степеней свободы для  $s_{\text{общ}}^2 = 2KL-1$ , для  $s_{\text{бл}}^2 = 2-1=1$ , для  $s_{\text{вар}}^2 = L-1$ , для  $s_{\text{ш}}^2 = (2KL-1)-(2-1)-(L-1)=2(KL-1)-(L-1)=r$ .

Для проверки гипотезы об отсутствии межблокового эффекта применяется статистика  $F_{1,r} = \frac{s_{\text{бл}}^2}{s_{\text{ш}}^2/r} = a$ . Критическое значение  $F_{1,r}$  находится

по таблицам  $F$ -распределения с 1 и  $r$  степенями свободы. Пусть критическое значение для достоверности 75% равно  $a_1$  и для достоверности 90% равно  $a_2$ . Тогда если  $a > a_1$ , то гипотеза отвергается с вероятностью 75%, а если  $a > a_2$ , то гипотеза отвергается с вероятностью 90%. Если  $a < a_1$ , то гипотеза не отвергается, т. е. межблокового эффекта нет.

Этот метод планирования эксперимента разработан в предположении, что отклик эксперимента подчиняется нормальному распределению или близкому к нему. В [4, 5] указывается, что некоторые авторы обращают внимание на злоупотребление гипотезой нормальности. Однако в данном случае эта гипотеза обоснована. В [6] утверждается, что если вариабельность результатов определяется большим количеством причин, то распределение результатов чаще всего подчиняется нормальному закону. Утверждение основано на том простом факте, что сумма бесконечного числа распределений есть нормальное распределение. В данном случае активное поведение, а тем более исход игры определяются большим количеством причин.

Из сравнения коэффициентов в (2) и (3) можно сделать вывод, верны ли гипотезы о поведении людей, а если верны, то насколько. В случае неверных гипотез описанный эксперимент можно использовать для улучшения гипотез. Для этого эксперимент проводится по циклической схеме. Ясно, что если межблоковый эффект значим, но не очень велик, то на следующем цикле требуется не выдвижение новых гипотез, а только корректировка уже имеющихся. Весь эксперимент на втором круге может быть проведен по упрощенной схеме.

При интерпретации результатов эксперимента на любом этапе необходимо брать во внимание качественный состав группы. Несогласование результатов имитационного эксперимента с результатами деловых игр может быть вследствие того, что игроки плохо ориентируются в ситуации и принимают нерациональные решения. Игра с группой игроков, имеющих представление о теории активных систем и вследствие этого поступающих более рационально, может дать лучшее согласование имитационного эксперимента и деловой игры. Экспериментатор должен принять решение, что более целесообразно — корректировать автоматы или обучать игроков. Необходимо помнить, что рекомендации, даваемые теорией активных систем, рассчитаны на образованных специалистов.

Структурная схема деловой игры (рис. 3, а) может иметь несколько вариантов:

- 1) один игрок — человек, остальные — автоматы (рис. 3, б),
- 2) промежуточный вариант (рис. 3, в),
- 3) все игроки — люди (рис. 3, г).

По исполнению самый легкий — первый вариант, так как в одной игре занят только один игрок. Самый сложный — последний вариант, так как он требует столько игроков, сколько элементов в моделируемой системе. Однако первый вариант нехорош при гипотезе слабого влияния. Экспери-

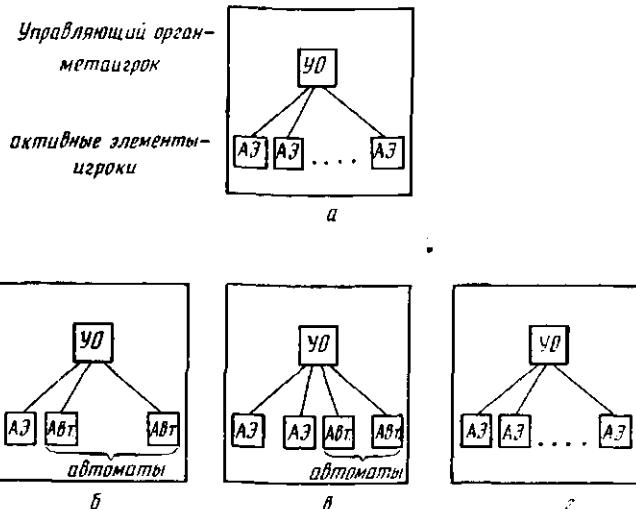


Рис. 3

ментатор должен выбрать тот из трех вариантов, который соответствует задаче эксперимента. Но в большинстве случаев, видимо, наиболее приемлем промежуточный вариант, так как он свободен от недостатков первого и требует меньше игроков, чем последний.

Таким образом, эксперимент в исследованиях организационных систем может разрабатываться на основании изложенного выше метода. Метод прост и может использоваться экспериментаторами, не знакомыми с теорией эксперимента.

#### 4. Пример

Изложенный метод был применен для исследования эффективности функционирования модели динамической активной системы с дальновидными элементами [3] при различных законах планирования.

Множество законов планирования состояло из пяти элементов. Задача была в том, чтобы выбрать закон планирования, максимизирующий критерий эффективности функционирования системы. Критерием эффективности была целевая функция системы, состоящая из целевых функций элементов. Аналитически задача не решается.

Выделено пять факторов, которые могут влиять на значение критерия эффективности функционирования,

- 1) закон планирования,
- 2) число элементов в системе,
- 3) объем выпуска продукции всей системой за планируемые периоды функционирования,

4) значение коэффициентов эффективности производства элементов,  
5) скорость роста коэффициентов эффективности производства. Факторы обозначаются соответственно  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ . Математическая модель полного факторного эксперимента в соответствии с задачей эксперимента имеет вид

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 5} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 5} b_{ij} x_i x_j + \dots + b_{12345} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 + \varepsilon.$$

Таблица 4

	$x_2$	$x_3$	$x_2x_3$	$x_4$	$x_2x_4$	$x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_5$	$x_2x_5$	$x_3x_5$	$x_2x_3x_5$	$x_4x_5$	$x_2x_4x_5$	$x_3x_4x_5$	$x_2x_3x_4x_5$
1	—	—	—	+	—	+	—	—	—	+	—	—	—	—	—
2	+	+	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+	—
3	+	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	+	+	+	+	+	+	+	—	—	—	—	—	—	—	—

Из физических соображений значимыми эффектами являются  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_1x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_1x_4$ ,  $x_5$ ,  $x_1x_5$ ,  $x_1x_4x_5$ . Остальные эффекты незначимы. Соответствующая математическая модель

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_3x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_4x_4 + \\ + b_{14}x_1x_4 + b_5x_5 + b_{15}x_1x_5 + b_{145}x_1x_4x_5 + \epsilon.$$

Особенность этого эксперимента в том, что фактор  $x_1$  имеет пять качественных уровней, тогда как остальные факторы устанавливаются на двух количественных уровнях, которые обозначаются  $+1$  или  $-1$ .

Для эксперимента был принят следующий план. Для каждого уровня фактора  $x_1$  остальные четыре фактора устанавливались на уровнях  $+1$  и  $-1$  в соответствии с планом — половиной репликой полного четырехфакторного плана, представленным табл. 4. Уровни  $+1$  и  $-1$  обозначаются в

Таблица 5

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	+	—	—	+	—
2	+	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—
4	—	+	—	—	+

Таблица 6

	$z_1$	$z_2$	$z_3 = z_1z_2$
1	+	—	—
2	+	—	—
3	—	—	—
4	—	—	—

таблице + и — соответственно. Таким образом, в плане сорок вариантов. По этому плану проводился имитационный эксперимент. Откликом эксперимента являлась целевая функция системы. В результате был найден механизм планирования, который максимизирует функцию отклика, а также установлен вид поверхности отклика, что позволило исследовать влияние всех факторов на значение целевой функции системы.

При планировании деловой игры для фактора  $x_1$  были выбраны два уровня, на одном из которых в имитационном эксперименте отклик был максимальным. А для факторов  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$  выбрали варианты 4 и 5 из половинной реплики по табл. 4, которые являются  $\frac{1}{8}$  репликой полного четырехфакторного эксперимента.

Таким образом, план деловой игры состоит из четырех вариантов. Факторы  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$  устанавливались на уровнях, как записано в табл. 5. Факторы  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$  смешиваются. Смешанный эффект этих факторов обозначается  $z_2$ . Через  $z_1$  обозначен эффект фактора  $x_1$ . Эффект взаи-

модействия  $z_1 z_2$  обозначен  $z_3$ . План деловой игры при таких обозначениях соответствует полному двухфакторному плану (табл. 6). Соответствующая математическая модель

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \alpha_3 z_3.$$

Из плана имитационного эксперимента выбраны соответствующие варианты. Оценки  $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3$  коэффициентов  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  получены из имитационного эксперимента, а оценки  $a_1, a_2, a_3, a_4$  коэффициентов  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  — из деловой игры. Оценки сравнивались, как описано выше.

Гипотеза о значимой разнице оценок  $a_0, a_1, a_2, a_3$  и  $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3$  не подтвердилась. Таким образом, в имитационном эксперименте был найден закон планирования, максимизирующий критерий эффективности системы, и деловая игра подтвердила полученный результат.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков В. Н., Ивановский А. Г., Немцева А. Н., Щепкин А. В. Организация и проведение деловых игр (методические материалы). М.: Ин-т проблем управления, 1975.
2. Burkov V. N., Schepkin A. V. The theory of organization management and business games in the USSR // Large Scale Systems. 1984. № 7. P. 207–218.
3. Бурков В. Н., Кондратьев В. В. Механизмы функционирования организационных систем. М.: Наука, 1981.
4. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. М.: Наука, 1967.
5. Налимов В. В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971.
6. Ашмарин И. П., Васильев Н. Н., Амбросов В. А. Быстрые методы статистической обработки и планирования эксперимента. Л.: Изд-во ЛГУ, 1971.