

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 519.71:330.322.54

З. М. ГАСАНОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладна математика», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 36, ел. пошта zakariya@ukr.net, ORCID 0000-0002-2312-8053

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПТИМИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИЙ НА РАЗВИТИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНЫХ ЗАТРАТ

Цель. Основной целью данного исследования является обоснование метода определения оптимального объема инвестиций на улучшение выбираемых руководством предприятия основных экономических показателей эффективности его работы при случайных расходах на каждом этапе развития. **Методика.** В основе предлагаемой методики определения оптимального объема инвестиций лежат методы имитационного моделирования и теории оптимального управления, в частности процедура динамического программирования, так как управляемый процесс развития предприятия является многоэтапным. Использование поэтапного планирования с генерацией затрат на переходы и статистической обработки результатов дает возможность получить решение задачи оптимизации, к которой нельзя применить методы математического анализа. **Результаты.** Разработан алгоритм расчета минимального объема капитальных вложений на улучшение выбранных экономических показателей. Построена оптимальная траектория развития предприятия от начального экономического до конечного желаемого состояния. При этом учтены непредвиденные промежуточные расходы в процессе развития предприятия. **Научная новизна.** Показано, что с помощью методов теории оптимального управления и имитационного моделирования можно произвести расчет минимального объема капитальных вложений на улучшение выбранных экономических показателей, которые определяют эффективность работы предприятия с учетом случайных затрат на промежуточные переходы по этапам развития. Причём такой расчет не зависит от конкретного содержания экономических показателей. **Практическая значимость.** Предлагаемая в статье методика расчета минимального объема капитальных вложений довольно проста, но в то же время позволяет, с одной стороны, определить приоритетные направления инвестиционной деятельности предприятия, а с другой – повышает управляемость и прозрачность хозяйственной деятельности предприятия, уверенность руководителя в правильности принимаемых решений.

Ключевые слова: оптимальное управление; имитационное моделирование; экономические показатели; эффективность работы; оптимальный объем инвестиций; оптимизация; конкурентоспособность; управляемость; динамическое программирование; оптимальная траектория; случайные затраты

Введение

Основные экономические показатели отражают результаты и успешность работы предприятия. С другой стороны, эффективная деятельность предприятия в долгосрочной перспективе, обеспечение высоких темпов его развития и повышения конкурентоспособности в

значительной мере определяются уровнем его инвестиционной активности и диапазоном инвестиционной деятельности. [1, 2, 6].

Инвестиционная активность предприятия зависит от многих факторов. Например, от распределения получаемого дохода на увеличение оборотных средств, улучшение различных показателей рентабельности, потребление и сбе-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

реження. В условиях низких среднелюдских доходов основная их часть расходуется на потребление. Рост доходов вызывает повышение их доли, направляемой на сбережения, которые служат источником инвестиционных ресурсов. Следовательно, рост удельного веса сбережений вызывает соответствующий рост объема инвестиций и наоборот. Также значительное влияние на объем инвестиций оказывает ожидаемая норма чистой прибыли. Это связано с тем, что прибыль является основным побудительным мотивом инвестиций. Чем выше ожидаемая норма чистой прибыли, тем выше будет объем инвестиций и наоборот [3–5, 7].

Как известно из [6–8], до начала инвестирования нужно выполнить комплекс работ для обоснования эффективности инвестиций на предприятие, называемый инвестиционным проектом. Подготовка инвестиционного проекта – длительный, а порой и очень дорогостоящий процесс, состоящий из ряда актов и стадий [1, 2, 6, 7, 9–13].

Главной целью инвестиционного проекта, направленного на развитие предприятия, как правило, является повышение чистой прибыли и показателей рентабельности, следовательно, повышение эффективности его работы до желаемого уровня. Одной из стадий подготовки проекта может быть определение оптимального (минимального) объема инвестиций. В работах [3, 8] приведена методика решения этой задачи с помощью методов теории оптимального управления [4, 5].

Отметим, что решение данной задачи существенно усложняется при непредвиденных (случайных) расходах по этапам развития предприятия. Поэтому методика, разработанная в работах [3, 8] в данном случае не применима. Данная работа является продолжением работы [8]. В ней приведен алгоритм определения оптимального (минимального) объема инвестиций при случайных расходах по этапам развития предприятия, разработанный на основе методов имитационного моделирования.

Цель

Основной целью данного исследования является обоснование метода определения оптимального объема инвестиций на улучшение

выбираемых руководством предприятия основных экономических показателей эффективности его работы при случайных расходах на каждом этапе развития.

Методика

Пусть

$$a_{i,j} = a_{i \rightarrow i+1,j}; \quad b_{i,j} = b_{i,j \rightarrow j+1};$$

$$c_{i,j} = c_{i \rightarrow i+1,j \rightarrow j+1}$$

– затраты на переходы от уровней (P_i, R_j) значений прибыли и показателя рентабельности до уровней (P_{i+1}, R_j) ; (P_i, R_{j+1}) ; (P_{i+1}, R_{j+1}) ,

где $i = 0, 1, \dots, N_k$; $j = 0, 1, \dots, M_k$ – номера шагов расчета, соответственно, а шагом расчета выступает месяц, квартал или год. Эти затраты могут быть рассчитаны с помощью так называемого метода дисконтирования, т. е. приведение разновременных доходов и расходов, осуществляемых в рамках инвестиционного проекта, к единому (базовому) моменту времени [6, 7]. Все расчеты осуществляются в базисных, прогнозных и в расчетных ценах.

В данной работе приведена методика расчета минимального объема инвестиций для достижения заданных значений P_k – чистой прибыли и R_k – показателя рентабельности предприятия при непредвиденных (случайных) расходах на каждом этапе развития предприятия, т.е. когда величины

$$a_{i \rightarrow i+1,j}; \quad b_{i,j \rightarrow j+1}; \quad c_{i \rightarrow i+1,j \rightarrow j+1}$$

являются случайными с заданными законами распределения.

В основе предлагаемой методики лежит процедура динамического программирования и имитационного моделирования [4, 5]. Данная процедура, используя поэтапное планирование, позволяет не только упростить решение задач оптимизации, но и решить те из них, к которым нельзя применить методы математического анализа.

Процедуру оптимизации объема инвестиций при известных переходных затратах,

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$a_{i \rightarrow i+1, j}; \quad b_{i, j \rightarrow j+1}; \quad c_{i \rightarrow i+1, j \rightarrow j+1}$$

приведено в роботі автора [8].

Согласно этой процедуре, процесс принятия решения об инвестиции начинается с последнего k -го шага. На этом шаге выбирают решение, позволяющее получить наибольший эффект – достижение конечного уровня (P_k, R_k) за минимальный объем инвестиций. Спланировав этот шаг, к нему можно присоединить предпоследний $(k-1)$ -й шаг, к которому, в свою очередь, $(k-2)$ -й и т. д.

Для того чтобы спланировать k -й шаг, надо знать уровень (P, R) предприятия на $(k-1)$ -м шаге. Если уровень (P, R) предприятия на $(k-1)$ -м шаге неизвестен, то рассматривают всевозможные уровни на этом шаге. Для каждого возможного уровня выбирают так называемое условно оптимальное решение на последнем, $k-m$, шаге.

Пусть планируется k -шаговый процесс инвестирования и $(P_{k-1,1}, R_{k-1,1}), (P_{k-1,2}, R_{k-1,2}), \dots, (P_{k-1,r}, R_{k-1,r})$ – возможные уровни на $(k-1)$ -м шаге. На последнем шаге найдем для каждого из них условно оптимальное решение. Таким образом, k -й шаг спланирован. Действительно, какой бы уровень (P, R) не был на предпоследнем шаге, уже известно, какое решение следует применить на последнем шаге. Аналогично поступаем на $(k-1)$ -м шаге, только условно оптимальные решения необходимо выбирать, учитывая уже выбранные условно оптимальные решения на $k-m$ шаге и т. д. В итоге приходим к первоначальному уровню (P_0, R_0) чистой прибыли и показателя рентабельности.

Для первого шага предположений о возможном уровне (P, R) не делаем, так как уровень (P_0, R_0) известен, а находим оптимальное решение, учитывая все условно оптимальные решения, найденные для второго шага. Проходя от (P_0, R_0) к (P_k, R_k) , получаем искомое оптимальное решение, которое обеспечивает минимальный объем инвестиций и их наилучшее распределение по шагам расчета.

В работе [8] приведен модельный пример, который демонстрирует работоспособность данной процедуры.

Часто на практике значения параметров (переходных затрат)

$$a_{i,j} = a_{i \rightarrow i+1, j}; \quad b_{i,j} = b_{i, j \rightarrow j+1};$$

$$c_{i,j} = c_{i \rightarrow i+1, j \rightarrow j+1}$$

являются случайными величинами. В частности, они могут быть определены с помощью формул:

$$a_{i,j} = \alpha_{i,j} a_{i,j}^0; \quad b_{i,j} = \beta_{i,j} b_{i,j}^0;$$

$$c_{i,j} = \sigma_{i,j} c_{i,j}^0;$$

где

$$\alpha_{i,j} \in [\alpha_{i,j}^1, \alpha_{i,j}^2]; \quad \beta_{i,j} \in [\beta_{i,j}^1, \beta_{i,j}^2];$$

$$\sigma_{i,j} \in [\sigma_{i,j}^1, \sigma_{i,j}^2]$$

– случайные коэффициенты коррекции переходных затрат с заданными законами распределения; $a_{i,j}^0; b_{i,j}^0; c_{i,j}^0$ – базовые значения переходных затрат для данной отрасли экономики. Параметры $\alpha_{i,j}; b_{i,j}; c_{i,j}, d_{i,j}; e_{i,j}; f_{i,j}$ могут быть определены с помощью статистического анализа изменения цен на продукцию и услуги, форс-мажорными обстоятельствами (в том числе, например, изменениями законодательства, связанного с экономикой).

Таким образом, однократным прохождением от (P_0, R_0) к (P_k, R_k) мы не получим оптимальное решение, которое обеспечивает минимальный объем инвестиций и их наилучшее распределение по шагам расчета из-за случайности переходных затрат.

В данной работе для решения этой задачи предлагаем использовать методы имитационного моделирования, а именно метод Монте-Карло. Суть его заключается и следующем. Пусть X_1, X_2, \dots, X_n – случайные входные параметры с заданными законами распределения, а Y – выходной параметр системы (рис. 1).

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

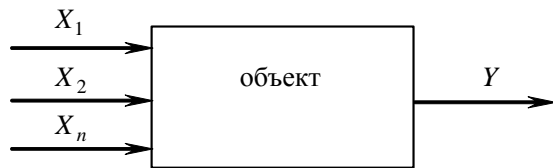


Рис. 1. Структурная схема функционирования объекта

Пусть известен характер (закон) зависимости параметра Y от входных параметров X_1, X_2, \dots, X_n (рис. 1):

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1)$$

Алгоритмически имитационная модель процесса функционирования объекта представляет собой программную реализацию формулы (1) путем генерации случайных величин X_1, X_2, \dots, X_n .

В нашем случае входными параметрами являются переходные затраты

$$a_{i,j} = \alpha_{i,j} a_{i,j}^0; \quad b_{i,j} = \beta_{i,j} b_{i,j}^0; \quad c_{i,j} = \sigma_{i,j} c_{i,j}^0,$$

Y – минимальный объем инвестиций, вычисленный с помощью процедуры метода динамического программирования (функция F), которая описана в работе [8].

Результаты

Согласно этому алгоритму, оптимальное решение (переход) от (P_0, R_0) к (P_k, R_k) удобно искать геометрическим способом на плоскости POR , а точнее на ограниченном прямыми

$$P = P_0, \quad P = P_k, \quad R = R_0, \quad R = R_k$$

прямоугольнике, который и является областью допустимых уровней. Начальный (P_0, R_0) и конечный (P_k, R_k) уровни вполне определены, как две точки плоскости (рис. 2) [8].

На рис. 2 вертикальные отрезки показывают увеличение показателя рентабельности при постоянном значении прибыли, горизонтальные отрезки показывают увеличение прибыли при постоянном значении показателя рентабельности, а диагональные отрезки показывают одновременное увеличение прибыли и показателя рентабельности.

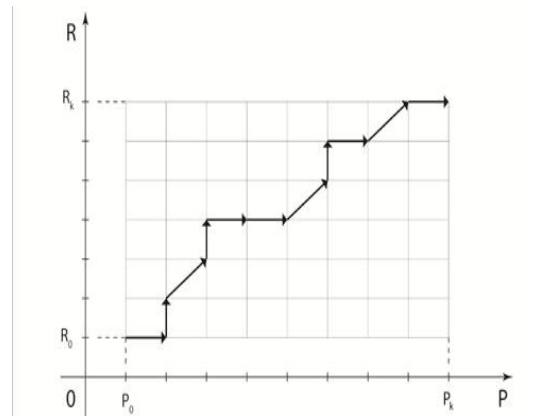


Рис. 2. Оптимальная траектория развития предприятия

Для каждой совокупности сгенерированных значений переходных затрат

$$a_{i,j} = \alpha_{i,j} a_{i,j}^0; \quad b_{i,j} = \beta_{i,j} b_{i,j}^0; \quad c_{i,j} = \sigma_{i,j} c_{i,j}^0$$

по вышеописанной процедуре строим свою оптимальную траекторию T перехода от (P_0, R_0) к (P_k, R_k) и вычисляем минимальный объем Y инвестиций.

Имитационная модель процесса принятия решения об объеме инвестирования и оптимальной траектории развития предприятия программно реализуется по следующему макроалгоритму:

Шаг 1. Определение и ввод базовых значений $a_{i,j}^0; b_{i,j}^0; c_{i,j}^0; \alpha_{i,j}^1, \alpha_{i,j}^2; \beta_{i,j}^1, \beta_{i,j}^2; \sigma_{i,j}^1, \sigma_{i,j}^2$, определение количества экспериментов (запусков имитационной модели) M .

Шаг 2. Генерация случайных величин $\alpha_{i,j}; \beta_{i,j}; \sigma_{i,j}$. Если они распределены равномерно, то генерацию можно произвести по формулам:

$$\alpha_{i,j} = (\alpha_{i,j}^2 - \alpha_{i,j}^1) \text{random} + \alpha_{i,j}^1;$$

$$\beta_{i,j} = (\beta_{i,j}^2 - \beta_{i,j}^1) \text{random} + \beta_{i,j}^1;$$

$$\sigma_{i,j} = (\sigma_{i,j}^2 - \sigma_{i,j}^1) \text{random} + \sigma_{i,j}^1.$$

В случае нормального распределения можно применить следующие формулы генерации случайных чисел:

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$\alpha_{i,j} = \sqrt{D(\alpha_{i,j})} \left(\sum_{i=1}^n z_i - \frac{n}{2} \right) / \sqrt{\frac{n}{12}} + M(\alpha_{i,j}),$$

$$\beta_{i,j} = \sqrt{D(\beta_{i,j})} \left(\sum_{i=1}^n z_i - \frac{n}{2} \right) / \sqrt{\frac{n}{12}} + M(\beta_{i,j}),$$

$$\sigma_{i,j} = \sqrt{D(\sigma_{i,j})} \left(\sum_{i=1}^n z_i - \frac{n}{2} \right) / \sqrt{\frac{n}{12}} + M(\sigma_{i,j}),$$

где $D(\cdot)$, $M(\cdot)$ – соответственно, дисперсия и математическое ожидание случайной величины; z_1, z_2, \dots, z_n – равномерно распределенные случайные величины из отрезка $[0, 1]$, $k \geq 12$.

Шаг 3. Построение оптимальной траектории T перехода от (P_0, R_0) к (P_k, R_k) и вычисление минимального объема Y инвестиций для данной совокупности сгенерированных значений переходных затрат.

Как отмечено в работе [8], если некоторая узловая точка (см. рис. 2) имеет несколько (два или три) условно оптимальных решений, то всех их отмечают стрелками, а затем выбирают любое из них. В этих случаях задача имеет несколько решений, если такие узловые точки принадлежат оптимальной траектории. Иначе говоря, полученный минимальный объем Y инвестиций для данной совокупности сгенерированных значений затрат может быть израсходован с помощью нескольких траекторий T перехода от (P_0, R_0) к (P_k, R_k) .

Шаг 4. Повторение шагов 2 и 3 M раз и интервальное выравнивание полученного статистического материала в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Результаты вычислительных экспериментов	
Y	$(Y_s^1, Y_s^2), s=1, \dots, m$
Частота траекторий T	$N_s, s=1, \dots, m$

Число m – количество интервалов, которое определяем по формуле Стерджесса:

$$m = 1 + 3 \cdot \lg M.$$

Длину h интервала (Y_i^1, Y_i^2) определяем по формуле:

$$h = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{m},$$

где Y_{\max}, Y_{\min} – суть максимальное и минимальное значения параметра Y , полученные в результате экспериментов.

В табл. 1 N_s – число траекторий, для которых $Y \in (Y_s^1, Y_s^2)$.

Шаг 5. Вычисление среднего значения

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y}{M}.$$

Очевидно, что при некотором значении $s = s^* \in [1, m]$ $\bar{Y} \in (Y_{s^*}^1, Y_{s^*}^2)$. Интервалу $(Y_{s^*}^1, Y_{s^*}^2)$ может соответствовать несколько траекторий T развития предприятия. Руководство предприятия может выбрать из них конкретный, наиболее удобный с точки зрения реализации, путь развития.

Научная новизна и практическая значимость

Показано, что с помощью методов теории оптимального управления и имитационного моделирования можно произвести расчет минимального объема капитальных вложений на улучшение выбранных экономических показателей, которые определяют эффективность работы предприятия при случайных затратах на промежуточные переходы по этапам развития.

Предлагаемая в статье методика довольно проста, но в то же время позволяет, с одной стороны, определить приоритетные направления инвестиционной деятельности предприятия, а с другой – повышает управляемость и прозрачность хозяйственной деятельности предприятия, уверенность руководителя в правильности принимаемых решений [8].

Выводы

Предложенная методика расчета не зависит от конкретного содержания экономических показателей. Результат зависит от точности определения законов распределения случайных величин $\alpha_{i,j}$; $\beta_{i,j}$; $\sigma_{i,j}$ с помощью методов математической статистики. А это, в свою очередь,

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

зависит от качества статистического анализа специфики хозяйственной деятельности предприятия.

Отметим, что приведенный алгоритм расчета можно применить для любой пары экономи-

ческих показателей эффективности работы любого предприятия, в том числе предприятия, связанного с железной дорогой [1,2, 8].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вечканов, Г. Инвестиции: объемы, динамика, структура / Г. Вечканов // *Экономист*. – 2012. – № 3. – С. 16–28.
2. Гайдук, Н. О. Оновлення рухомого складу як пріоритетний напрямок інвестиційної діяльності «Укрзалізниця» / Н. О. Гайдук, О. М. Пшінько // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 35. – С. 219–222.
3. Гасанов, З. М. Моделирование процесса оптимизации инвестиций на развитие предприятия при случайных затратах / З. М. Гасанов // *Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті : тези XI Міжнар. наук.-практ. конф. (13–14 груд. 2017 р.)*. – Дніпро, 2017. – С. 29.
4. Кузнецов, Ю. Н. Математическое программирование / Ю. Н. Кузнецов, В. И. Кузубов, А. Б. Волощенко. – Москва : Высшая школа, 1976. – 352 с.
5. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – Москва : Наука, 1976. – 392 с.
6. Теплова, Т. В. Инвестиции : учебник / Т. В. Теплова. – Москва : Юрайт, 2011. – 724 с.
7. Arif, F. Decision Support Framework for Infrastructure Maintenance Investment Decision Making / F. Arif, M. E. Bayraktar, A. G. Chowdhury // *Journal of Management in Engineering*. – 2016. – Vol. 32. – Iss. 1. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000372](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000372)
8. Gasanov, Z. M. About optimizing of investment volumes to improve the basic indicators of the enterprise effectiveness / Z. M. Gasanov // *Наука та прогрес транспорту*. – 2015. – № 1 (55). – С. 122–128. doi: <http://doi.org/10.15802/stp.2015/38258>
9. Guo, M.-W. Evaluation of profit variable weight of risk investment enterprises financial profit of risk investment projects based on set pair theory / M.-W. Guo // *Wuhan Ligong Daxue Xuebao / Journal of Wuhan University of Technology*. – 2010. – Vol. 32. – Iss. 3. – P. 147–150.
10. Kuhn, D. Stochastic Optimization of Investment Planning Problems in the Electric Power Industry / D. Kuhn, P. Pappas, B. Rustem // *Process Systems Engineering* / E. N. Pistikopoulos, M. C. Georgiadis, V. Dua (Eds). – Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014. – P. 215–230. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527631209.ch48>
11. Sahin, M. A new mixed-integer linear programming formulation and particle swarm optimization based hybrid heuristic for the problem of resource investment and balancing of the assembly line with multi-manned workstations / M. Sahin, T. Kellegoz // *Computers & Industrial Engineering*. – 2019. – Vol. 133. – P. 107–120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.056>
12. Svensson, E. A model for optimization of process integration investments under uncertainty / E. Svensson, A.-B. Strömberg, M. Patriksson // *Energy*. – 2011. – Vol. 36. – Iss. 5. – P. 2733–2746. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.013>
13. The optimization of investment strategy for resource utilization and energy conservation in iron mines based on Monte Carlo and intelligent computation / Y. He, N. Liao, J. Rao, F. Fu, Z. Chen // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 232. – P. 672–691. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.347>

З. М. ГАСАНОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладна математика», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 36, ел. пошта zakariya@ukr.net, ORCID 0000-0002-2312-8053

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОПТИМІЗАЦІЇ ІНВЕСТИЦІЙ НА РОЗВИТОК ПІДПРИЄМСТВА З УРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВИХ ВИТРАТ

Мета. Основною метою цього дослідження є обґрунтування методу визначення оптимального обсягу інвестицій на поліпшення обраних керівництвом підприємства основних економічних показників ефективності його роботи за випадкових витрат на кожному етапі розвитку. **Методика.** В основі запропонованої методики визначення оптимального обсягу інвестицій лежать методи імітаційного моделювання й теорії оптимального управління, зокрема процедура динамічного програмування, оскільки керований процес розвитку підприємства є багатоетапним. Використання поетапного планування з генерацією витрат на переходи і статистичної обробки результатів дає можливість отримати розв'язок задачі оптимізації, до якої не можна застосувати методи математичного аналізу. **Результати.** Розроблено алгоритм розрахунку мінімального обсягу капітальних вкладень на поліпшення обраних економічних показників. Побудовано оптимальну траєкторію розвитку підприємства від початкового економічного до кінцевого бажаного стану. При цьому враховані непередбачені проміжні витрати в процесі розвитку підприємства. **Наукова новизна.** Показано, що за допомогою методів теорії оптимального управління та імітаційного моделювання можна розрахувати мінімальний обсяг капітальних вкладень на поліпшення обраних економічних показників, які визначають ефективність роботи підприємства з урахуванням випадкових витрат на проміжні переходи за етапами розвитку. Причому такий розрахунок не залежить від конкретного змісту економічних показників. **Практична значимість.** Запропонована в статті методика розрахунку мінімального обсягу капітальних вкладень досить проста, але водночас дозволяє, з одного боку, визначити пріоритетні напрямки інвестиційної діяльності підприємства, а з другого – підвищує керованість і прозорість господарської діяльності підприємства, упевненість керівника в правильності прийнятих рішень.

Ключові слова: оптимальне управління; імітаційне моделювання; економічні показники; ефективність роботи; оптимальний обсяг інвестицій; оптимізація; конкурентоспроможність; керованість; динамічне програмування; оптимальна траєкторія; випадкові витрати

Z. M. GASANOV^{1*}

^{1*}Dep. «Applied Mathematics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 36, e-mail zakariya@ukr.net, ORCID 0000-0002-2312-8053

MODELING THE OPTIMIZATION PROCESS OF INVESTMENTS IN DEVELOPMENT OF THE ENTERPRISE TAKING INTO ACCOUNT RANDOM COSTS

Purpose. The study aims at substantiating the method to determine the optimal volume of investments for improving basic economic indicators of the enterprise's performance selected by the company management at random costs at each stage of its development. **Methodology.** The proposed methodology for determining the optimal investment volume is based on simulation modeling methods and optimal control theory, in particular, the dynamic programming procedure, since the controlled process of the enterprise's development is a multi-step one. Using step-by-step planning with generation of costs for transitions and statistical processing of results, a solution to optimization problem was obtained, to which the methods of mathematical analysis cannot be applied. **Findings.** An algorithm has been developed for calculating the minimal volume of capital investments for improving selected economic indicators and constructing the optimal trajectory for the enterprise's development from the initial economic state to the final desired state. This takes into account unforeseen intermediate costs in the process of enter-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

prise development. **Originality.** It is shown that using the methods of the theory of optimal control and simulation modeling, it is possible to calculate the minimal amount of capital investments to improve the selected economic indicators that determine the efficiency of the enterprise performance, taking into account the random costs of intermediate transitions by the development stages. Such calculation does not depend on the specific content of economic indicators. **Practical value.** The proposed methodology for calculating the minimal volume of capital investments is quite simple, but at the same time it allows, on the one hand, determining the priority areas of the enterprise's investment activities. On the other hand, it increases the manageability and transparency of the enterprise's economic activity, and increases the manager's confidence in the correctness of the decisions made.

Keywords: optimal control; simulation modeling; economic indicators; efficiency; optimal investment volume; optimization; competitiveness; manageability; dynamic programming; optimal trajectory; random costs

REFERENCES

1. Vechkanov, G. (2012). Investitsii: obemy, dinamika, struktura. *The Economist*, 3, 16-28. (in Russian)
2. Ghayduk, N. A., & Pshinko, O. M. (2010). Rolling Stock Renovation as the Priority of Ukrzaliznytsya's Investments. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 35, 219-222. (in Ukrainian)
3. Gasanov, Z. M. (2017). *Modelirovanie protsessu optimizatsii investitsiy na razvitie predpriyatiya pri sluchaynykh zatratkakh. Abstracts of the XI International Scientific and Practical Conference «Modern Information and Communication Technologies in Transport, Industry and Education»*. Dnipro. (in Russian)
4. Kuznetsov, Y. N., Kuzubov, V. L., & Voloshchenko, A. B. (1976). *Matematicheskoe programmirovaniye*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
5. Pontryagin, L. S., Boltyanskiy, V. G., Gamkrelidze, R. V., & Mishchenko, Y. F. (1976). *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov*. Moscow: Nauka. (in Russian)
6. Teplova, T. V. (2011). *Investitsii: uchebnik*. Moscow: Yurayt. (in Russian)
7. Arif, F., Bayraktar, M. E., & Chowdhury, A. G. (2016). Decision Support Framework for Infrastructure Maintenance Investment Decision Making. *Journal of Management in Engineering*, 32(1). doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000372](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000372) (in English)
8. Gasanov, Z. M. (2015). About optimizing of investment volumes to improve the basic indicators of there enterprise effectiveness. *Science and Transport Progress*, 1(55), 122-128. doi: <http://doi.org/10.15802/stp.2015/38258> (in English)
9. Guo, M.-W. (2010). Evaluation of profit variable weight of risk investment enterprises financial profit of risk investment projects based on set pair theory. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Journal of Wuhan University of Technology)*, 32(3), 147-150. (in English)
10. Kuhn, D., Pappas, P., & Rustem, B. (2014). Stochastic Optimization of Investment Planning Problems in the Electric Power Industry. In E. N. Pistikopoulos, M. C. Georgiadis, V. Dua (Eds), *Process Systems Engineering* (pp. 215-230). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527631209.ch48> (in English)
11. Şahin, M., & Kellegöz, T. (2019). A new mixed-integer linear programming formulation and particle swarm optimization based hybrid heuristic for the problem of resource investment and balancing of the assembly line with multi-manned workstations. *Computers & Industrial Engineering*, 133, 107-120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.056> (in English)
12. Svensson, E., Strömberg, A.-B., & Patriksson, M. (2011). A model for optimization of process integration investments under uncertainty. *Energy*, 36(5), 2733-2746. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.013> (in English)
13. He, Y., Liao, N., Rao, J., Fu, F., & Chen, Z. (2019). The optimization of investment strategy for resource utilization and energy conservation in iron mines based on Monte Carlo and intelligent computation. *Journal of Cleaner Production*, 232, 672-691. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.347> (in English)

Поступила в редколлегию: 06.03.2019

Принята к печати: 01.07.2019