

Методика экологического инжиниринга в концепции цифрового города

doi



С. М. Сергеев,
к. т. н., доцент,
Санкт-Петербургский
политехнический
университет
Петра Великого
sergeev2@yandex.ru



И. Н. Бурилич,
к. т. н., доцент,
кафедра алгебры,
геометрии и теории обучения
математике, Курский
государственный
университет
burili4@yandex.ru



Г. С. Толстова,
к. ф-м. н., доцент,
кафедра алгебры,
геометрии и теории обучения
математике, Курский
государственный
университет
tolstova_gs@list.ru



Д. Н. Тютюнов,
к. т. н., доцент,
кафедра высшей
математики,
Юго-Западный
государственный
университет
tjutjunov@mail.ru

Работа посвящена проблеме комплексного взаимодействия с окружающей социальной и бизнес средой в сегменте долговременных участников различной деловой активности. При исследовании учтена периодичность большинства экономических процессов, имеющая сложную характеристику. При выборе критерия оптимизации учитываются негативные последствия результатов такой деятельности рассматриваемые как эффекты экстерналий, необходимые при учете экологического фактора. Рассматривается оценка экономических или административных мер, направленных на уменьшение отрицательных эффектов такой деятельности. В работе предложена математическая модель, которую возможно заложить в основу инновационных систем принятия решений, нацеленных на учет экстерналий широкого спектра общегосударственной, институциональной, деловой и социальной активности.

Ключевые слова: экология, инжиниринг, математическая модель, цифровой город.

Введение

Современная экономика в масштабах государства отражает не только системное взаимодействие предприятий, связанных общими интересами и обязательствами. Более глубокий подход показывает, что наиболее сложными для формализации [1] являются эффекты экстерналий, сопровождающие большинство видов активности в развитом современном обществе. Под данным термином понимаются последствия экономической деятельности, в первую очередь негативные, которые необходимо учитывать при планировании на достаточно протяженный горизонт времени.

Отметим, что как положительные, так и отрицательные экстерналии относятся не только к воздействию на экологию или на условия ведения хозяйственной деятельности другими участниками экономического пула [2]. Гораздо масштабнее социальное влияние ущерба, который необходимо оценивать для того, чтобы включить его в систему экономических показателей деятельности того или иного субъекта [3].

Важнейшей особенностью любого вида активности является рыночная неопределенность [4], которую можно учитывать применением математического аппарата теории стохастических процессов. Кроме того, следует учитывать фактор сезонности [5]. Это позволяет отразить неравномерность спроса на товары и услуги, на загрузку предприятий, транспорта, окружающую среду. Таким образом, необходимо привлекать математическое моделирование с использованием периодических функций.

Математическая модель должна отражать дополнительную нагрузку на предприятие, что влияет на прибыльность его деятельности, но при этом снижает неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Устранение или значительное уменьшение отрицательных экстерналий, во многом достигается за счет принудительных мер регулирования, влияющих на показатели предприятия, т. е. на интернализацию проблем. В частности, меры по сохранению экологии принуждают предприятия расходовать значительные средства на более безопасные технологии, а в индустрии туризма для сохранения исторического наследия

вводятся экологические сборы или туристический налог. То же самое относится к некоммерческому сегменту государственных структур, когда оценивается социальный ущерб и совокупная социально-экономическая эффективность.

При решении поставленной задачи, авторами использовались методы основанные на использовании теории вариационного исчисления, дифференциальных уравнений, математических игр и поиска оптимального управления. Привязка результатов к экономическим показателям является частью процесса принятия обоснованных управленческих решений.

Основные формализмы

При описании процессов в рамках реализации математической модели, позволяющей применить методы поиска оптимальных решений, введем ряд формализмов. Зависимость нагрузки $\Lambda(t)$ на ресурсы может быть представлена в виде ряда Фурье:

$$\Lambda(t) = \Lambda_0 + \sum_{i=1}^{+\infty} \Lambda_i \cos\left(2\pi \frac{i}{T} t + \psi_i\right) = \sum_{i=1}^{+\infty} \lambda_i(t),$$

где T — период, который в общем случае можно принять равным календарному году; $\lambda_i(t)$, где $i=1,2$ — периодическая составляющая декомпозиции $\Lambda(t)$; t — время; Λ_i, ψ_i — соответственно амплитуда и начальная фаза i -й гармоники

Далее выводим дифференциальные уравнения по аналогии с системой Эрланга. Для этого введем: $v_i(t)$ — периодические функции отражающие возможности общих ресурсов; $E_i(t)$ — состояния системы; соответствующие им вероятности: $p_i(t) = \varphi_i(t) + \alpha_i(t)$, где функции $\varphi_i(t)$ — периодические с $T/2\pi i$ периодом; $\alpha_i(t)$ — отклонение от стационарного режима;

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha_i(t) = 0,$$

при всех возможных i . Смысл функций $\varphi_i(t)$ состоит в стационарных вероятностях значений $p_i(t)$. Здесь необходимо отметить, что с одной стороны процесс выхода на режим близкий к установившемуся занимает время, которое в нашем случае будет меньше [6],

Таблица 1

Расчет затрат предприятий и модель экстерналий

Ситуация	Предприятие			Модель
	1	2	3	
	Расходы			Вектор
0, 0, 0	ω	ω	ω	
0, 0, 1	ω	ω	0	$(1-p_1)(1-p_2)p_3$
0, 1, 0	ω	0	ω	$(1-p_1)p_2(1-p_3)$
0, 1, 1	$\psi^* + \omega$	ψ^*	ψ^*	$(1-p_1)p_2p_3$
1, 0, 0	0	ω	ω	$p_1(1-p_2)(1-p_3)$
1, 0, 1	ψ	$\psi + \omega$	ψ	$p_1(1-p_2)p_3$
1, 1, 0	ψ	ψ	$\psi + \omega$	$p_1p_2(1-p_3)$
1, 1, 1	ψ^*	ψ^*	ψ^*	$p_1p_2p_3$

чем наш период равный году, кроме того, полученное стационарное решение также будет периодическим с тем же периодом.

Поиск решения проводим для каждой из i -й гармоники разложения нагрузки на ресурсы. Отметим, что, так как члены разложения Фурье быстро убывают, достаточно сделать расчет нескольких (3...4) первых гармоник. Для любого i запишем:

$$p'_{0i}(t) = -\lambda_i(t) p_{0i}(t) + v_i(t) p_{1i}(t),$$

$$p'_{1i}(t) = -v_i(t) p_{1i}(t) + \lambda_i(t) p_{0i}(t),$$

где индекс 0 означает отсутствие нагрузки, соответственно, 1 — загруженность ресурса. Эта система дифференциальных уравнений, интегрируемая в квадратурах. Соответствующее решение имеет вид:

$$p_{0i}(t) = \exp\left\{-\int_0^t [\lambda_i(x) + v_i(x)] dx\right\} \times \left[\alpha_i + \int_0^t v_i(x) \exp\left\{-\int_0^x [\lambda_i(x) + v_i(x)] dx\right\} dx\right].$$

При этом необходимо отметить, что возможность аналитически выразить зависимость $p_i(t)$ принципиально меняет сам алгоритм [7], лежащий в основе систем принятия решений. Для анализа периодических процессов введем параметр k , удовлетворяющий неравенству: $kT \leq t < (k+1)T$. Это позволяет получить в итоге выражение для расчета функции $\varphi_i(t)$:

$$\varphi_i(t) = ka_i + \int_0^{\tau} [\lambda_i(z) + v_i(z)] dz,$$

где

$$a_i(t) = \int_0^T [\lambda_i(x) + v_i(x)] dx, \tau = t - kT.$$

Искомый результат для $p_{0i}(t)$ — получается в следующем, удобном виде:

$$p_{0i}(t) = \exp[-\varphi_i(\tau)] \left[\frac{b_i}{\exp(a_i) - 1} + \int_0^{\tau} v_i(x) \exp[-\varphi_i(x)] dx \right] + \exp[ka_i - \varphi_i(\tau)] \left[\alpha_i - \frac{b_i}{\exp(a_i) - 1} \right],$$

где

$$b_i = \int_0^T v_i(x) \exp[\varphi_i(x)] dx.$$

Данный набор аналитических зависимостей служит алгоритмической основой разработки систем принятия решений [8] в ситуациях, когда процессы носят периодический характер сложной формы. Точность моделирования периодических процессов будет тем выше, чем большее число гармонических составляющих [9] учитывается.

Методика расчета

Проведем расчет интернализации по математической модели. Рассмотрим функционирование N предприятий, оказывающих экстерналии как негативное внешнее влияние. Уменьшение действия экстерналий можно достичь путем дополнительных затрат.

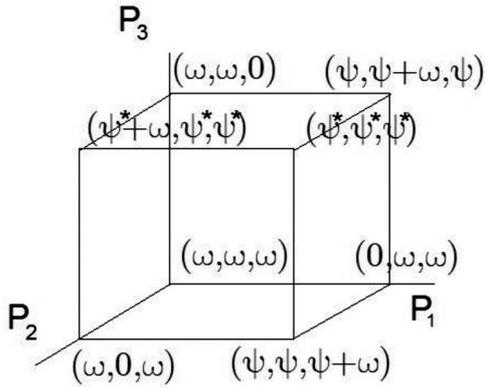


Рис. 1. Множество допустимых решений

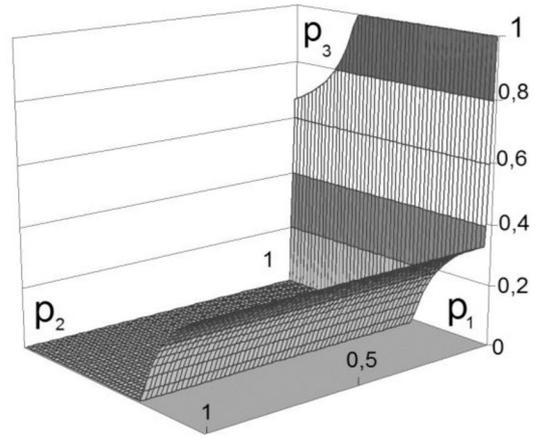


Рис. 2. Граничные зоны решения

Тогда

$$\bar{P} = (p_1, p_2, \dots, p_N)$$

вектор поиска оптимального равновесного решения. Поиск проводится внутри N -мерного куба ситуаций [10]. Для наглядности рассмотрим табл. 1 для $N=3$.

В табл. 1 для расчета потерь введен размер дополнительных расходов ω , которые несут предприятия при выборе стратегии, связанной со снижением ущерба от экстерналий (например очистка отходов, экологический налог или туристический сбор). Также учтено различие в подходах предприятий [11], как разницу нанесенного ущерба ψ^* и ψ . Из табл. 1 следует, что значение ψ^* соответствует самому неблагоприятному случаю отсутствия затрат на восстановление экологии, а ψ отражает наличие частичных мер по сохранению экологии. Введем обозначение:

$$\bar{p}_i = 1 - p_i, \forall i$$

и перемножим почленно следующий вектор:

$$(\bar{p}_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3, \bar{p}_1 \bar{p}_2 p_3, \bar{p}_1 p_2 \bar{p}_3, \bar{p}_1 p_2 p_3, p_1 \bar{p}_2 \bar{p}_3, p_1 \bar{p}_2 p_3, p_1 p_2 \bar{p}_3, p_1 p_2 p_3)$$

на соответствующие векторы табл. 1. Найдем равновесную по Нэшу ситуацию, от которой невыгодно

отклоняться как предприятиям с точки зрения затрат, так и с точки зрения сохранения экологии. Получим два условия равновесия. Первое соответствует нижней границе:

$$\begin{aligned} & -\omega (1-p_1) (1-p_2) (1-p_3) - \omega (1-p_1) (1-p_2) p_3 - \\ & -\omega (1-p_1) p_2 (1-p_3) - (\psi^* + \omega) (1-p_1) p_2 p_3 - \\ & - \psi p_1 (1-p_2) p_3 - \psi p_1 p_2 (1-p_3) - \psi^* p_1 p_2 p_3 \geq \\ & \geq -\omega (1-p_2) (1-p_3) - \omega p_2 (1-p_3) - \omega (1-p_2) p_3 - \\ & - (\psi^* + \omega) p_2 p_3. \end{aligned}$$

Также получим неравенство, отражающее верхнюю границу:

$$\begin{aligned} & -\omega (1-p_1) (1-p_2) (1-p_3) - \omega (1-p_1) (1-p_2) p_3 - \\ & -\omega (1-p_1) p_2 (1-p_3) - (\psi^* + \omega) (1-p_1) p_2 p_3 - \\ & - \psi p_1 (1-p_2) p_3 - \psi p_1 p_2 (1-p_3) - \psi^* p_1 p_2 p_3 \geq \\ & \geq -\psi p_2 (1-p_3) - \psi (1-p_2) p_3 - \psi^* p_2 p_3. \end{aligned}$$



Рис. 3. Интенсивность потока гостей

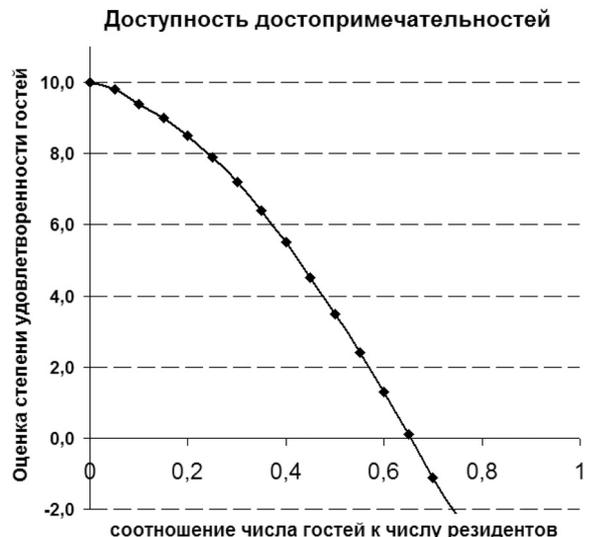


Рис. 4. Степень удовлетворенности

После преобразования получим их окончательный вид:

$$\left. \begin{aligned} \omega p_1 - \psi p_2 p_3 - \psi p_1 p_3 + 2\psi p_1 p_2 p_3 &\geq 0 \\ -\omega(1-p_1) + \psi(p_2 + p_3)(1-p_1) - 2\psi p_2 p_3(1-p_1) &\geq 0 \end{aligned} \right\}$$

Аналогично, расписываем уравнения для остальных участников деятельности, сопровождающейся экстерналиями. Их можно объединить в систему:

$$\left. \begin{aligned} \omega p_2 - \psi^* p_2 p_3 - \psi p_1 p_2 + 2\psi p_1 p_2 p_3 &\geq 0 \\ \omega(1-p_2) - \psi^*(1-p_2)p_3 - \psi p_1(1-p_2) + 2\psi p_1(1-p_2)p_3 &\geq 0 \\ \omega p_3 - \psi^* p_2 p_3 - \psi p_1 p_3 + 2\psi p_1 p_2 p_3 &\geq 0 \\ \omega(1-p_3) - \psi^*(1-p_3)p_2 - \psi p_1(1-p_3) + 2\psi p_1(1-p_3)p_2 &\geq 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

Множество допустимых управлений, находится внутри многомерного куба ситуаций (рис. 1).

Для случая $N=3$ это представлено на рис. 1. В вершинах отмечены экономические показатели.

Решая совместно полученные уравнения, в результате получаем в многомерном пространстве области $\{p_1, p_2, p_3\}$ содержащие набор равновесных по Нэшу ситуаций. Из вида неравенств можно сделать вывод, что решения находятся на пересечении гиперболических поверхностей с участками плоскостей. На рис. 2 представлены результаты моделирования для первого предприятия. Уравнения представляют собой гиперболические поверхности, имеющие несколько точек пересечения дающих искомое решение. Решая систему (1) получим три вектора

$$P = (\bar{p}_1; \bar{p}_2; \bar{p}_3)$$

решений, дающих устойчивые [12] состояния, компоненты которых имеют значения:

$$P^* = (0; 0; 0),$$

$$P^{**} = \left\{ \frac{\omega - \psi \frac{\psi + (\psi^2 - 2\omega\psi)^{1/2}}{2\psi} + 2\psi \left[\frac{\psi + (\psi^2 - 2\omega\psi)^{1/2}}{2\psi} \right]^2}{\psi \left[(\psi + (\psi^2 - 2\omega\psi)^{1/2}) / 2\psi \right]^2}; \frac{\psi + (\psi^2 - 2\omega\psi)^{1/2}}{2\psi}; \frac{\psi + (\psi^2 - 2\omega\psi)^{1/2}}{2\psi} \right\},$$

$$P^{***} = \left\{ \frac{\omega - \psi \frac{\psi - (\psi^2 - 2\omega\psi)^{1/2}}{2\psi} + 2\psi \left[\frac{\psi - (\psi^2 - 2\omega\psi)^{1/2}}{2\psi} \right]^2}{\psi \left[(\psi - (\psi^2 - 2\omega\psi)^{1/2}) / 2\psi \right]^2}; \frac{\psi - (\psi^2 - 2\omega\psi)^{1/2}}{2\psi}; \frac{\psi - (\psi^2 - 2\omega\psi)^{1/2}}{2\psi} \right\}.$$

Практическое приложение результатов

Каждое из трех полученных решений отражает различные ситуации. Тривиальное P^* соответствует диспозитивному методу правового регулирования. Оно

отражает равновесие [13] в условиях отсутствия затрат участников на трансформацию внешних эффектов во внутренние. Решение P^{**} соответствует наличию ограничительных мер в виде регулятивных норм, однако, не столь радикальных, как решение P^{***} .

Рассмотрим применение полученной методики на примере сведений по Санкт-Петербургу. Поток прибывающих людей складывается из туристов, участников мероприятий сегмента делового туризма, спортивных, культурных и политических мероприятий [14]. Такая нагрузка на ограниченные ресурсы города, во-первых, неравномерна в течение года, во-вторых, неблагоприятно отражается на состоянии достопримечательностей имеющих предел пропускной способности. Для администрации города одной из наиболее острых проблем является разработка ограничительных мер, которые в то же время не нанесут ущерба имиджу Петербурга и оптимальным образом поддержат баланс прибыли от туристического бизнеса, составляющего значительную долю поступлений в городской бюджет. Для решения задачи использованы данные рис. 3 по количеству прибывающих гостей, построенные после разложения в ряд Фурье численных данных комитета по туризму. На рис. 4 отражены сведения по уровню качества пребывания в Петербурге, построенные на основании отзывов гостей с применением стандартной Франкфуртской таблицы. По оси абсцисс отложено соотношение числа гостей к численности резидентов, по оси ординат степень удовлетворенности по десятибалльной шкале.

Применение математической модели позволит дать рекомендации по уровню экологического налога, расчет которого основан на балансе выгоды от туристического потока и минимумом ущерба, наносимого инфраструктуре города. Отметим, что применение административных регуляторов носит экономический характер [14] и предписывает хозяйствующим субъектам [15] определенное поведение, что в комплексе отражается на состоянии экономической системы.

Заключение

В настоящее время, при определении целесообразности интернализации неблагоприятного воздействия на окружающую среду, управленческие структуры или органы администрации, используют эвристические методы не основанные на выверенном, научно обоснованном расчете. Полученные в настоящей работе результаты, в первую очередь математическая модель, разработанное решение, могут служить основой экспертной системы. Обработка в автоматическом режиме статистики и экономической отчетности, позволяют встроить данную систему в концепцию цифрового города.

Список использованных источников

1. L. N. Borisoglebskaya, S. M. Sergeev. Model of assessment of the degree of interest in business interaction with the university// Journal of Applied Economic Sciences, 2018. Vol. XII, Iss. 8 (54). Winter 2017. P. 2423-2448.

2. V. V. Provotorov. Boundary control of a parabolic system with distributed parameters on a graph in the class of summable functions//Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76. No. 2. P. 318-322.
3. S. V. Krasnov, S. M. Sergeev, N. V. Mukhanova, A. N. Grushkin. Methodical forming business competencies for private label//Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) 6th International Conference ICRITO. 2017. P. 569-574.
4. S. Krasnov, S. Sergeev, A. Titov, Ye. Zotova. Modelling of digital communication surfaces for products and services promotion//International Scientific Conference «Digital Transformation on Manufacturing, Infrastructure and Service» 21-22 November 2018, Saint-Petersburg, Russian Federation. Volume 497. 2019. P. 012032.
5. O. Iliashenko, S. Krasnov, S. Sergeev. Calculation of high-rise construction limitations for non-resident housing fund in megacities//E3S Web of Conferences. «High-Rise Construction 2017, HRC 2017». 2018. P. 03006.
6. O. J. Kravets, S. A. Barkalov, N. A. Butyrina, V. D. Sekerin, A. E. Gorokhova. Processes of multidimensional classification of scoring objects with heterogeneous features based on the neural networks modeling//International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 119. No. 7a. P. 875-879.
7. S. M. Sergeev, V. Sumenkova. Mathematical modeling of an adaptive automated warehouse//Modern Informatization problems in economics and safety MIP-2019'ES Proceedings of the XXIV-th International Open Science Conference. Yelm, 2019. P. 107-113.
8. S. M. Sergeev. Cross-system way of looking to business with limited resources//Selected Papers of the International Scientific School «Paradigma» Winter-2016 (Varna, Bulgaria)/Compiling Editor O. Ja. Kravets. Yelm, WA, USA, 2016. P. 95-102.
9. S. Sergeev, T. Kirillova, I. Krasnyuk. Modelling of sustainable development of megacities under limited resources//TPACEE-2018. 2019 E3S Web of Conferences 91, 05007 (2019).
10. V. V. Provotorov, S. M. Sergeev, A. A. Part. Solvability of hyperbolic systems with distributed parameters on the graph in the weak formulation//Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes. 2019. Vol. 15. № 1. P. 107-117.
11. S. Sergeev, L. Borisoglebskaya, O. Pilipenko. Economically Optimal Digital Solutions to Manage Integrated Network Flows//Proceedings of the 2nd International Scientific conference on New Industrialization: Global, national, regional dimension (SICNI 2018). P. 416-421.
12. S. M. Sergeev, T. I. Sidnenko, D. B. Sidnenko. Distribution centers for agriculture, their modeling//International Scientific School «Paradigma» Summer-2016 Selected Papers. Yelm, WA, USA, 2016. P. 92-97.
13. I. A. Krasnyuk, V. V. Bakharev, N. A. Kozlova, D. D. Mirzoeva. Staffing in the sphere of trade: the main issues and prospects of solution//Proceedings of 2017 IEEE 6th Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations), SPUE 2017 6. 2018. P. 48-50.
14. S. M. Sergeev. Expansion of DEA methodology on the multimodal conception for the 3PL//Modern informatization problems in simulation and social technologies Proceedings of the XXIII-th International Open Science Conference 2018. P. 169-176.
15. S. M. Sergeev. Cross-systems method of approach to energy economy higher educational institutions//Economics. Society: Selected Papers of the International Scientific School «Paradigma» (Summer-2015, Varna, Bulgaria) Yelm, WA, USA, 2015. P. 38-41.

Technology of ecological engineering in the concept of the digital city

S. M. Sergeev, PhD, associate professor, Institute of industrial management, economy and trade, Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.

I. N. Burilich, candidate of technical sciences, associate professor, department of algebra, geometry and theory of teaching mathematics, Kursk state university.

G. S. Tolstova, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, department of algebra, geometry and theory of teaching mathematics, Kursk state university.

D. N. Tyutyunov, candidate of technical sciences, associate professor, higher mathematics chair, Kursk south-west state university.

The work is devoted to the problem of complex interaction with the surrounding social and business environment in the segment of long-term participants of various business activities. The study takes into account the periodicity of most economic processes, which has a complex characteristic. When selecting the optimization criterion, the negative consequences of the results of such activities are considered as externalities effects that are necessary when taking into account the environmental factor. It considers the assessment of economic or administrative measures aimed at reducing the negative effects of such activities. As a result, a mathematical model has been proposed that can be used as a basis for decision-making systems aimed at accounting for externalities of a wide range of nationwide, institutional, business and social activity.

Keywords: ecology, engineering, mathematical model, digital city.