УДК 519.2 + 330.3
JEL C65

В. Н. Павлов

Санкт-Петербургский государственный торгово-экономический университет
ул. Новороссийская, 50, Санкт-Петербург, 194021, Россия

victor_n_pavlov@mail.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

В инновационных процессах существенную роль играют два типа неопределенности: неопределенность целей и неопределенность располагаемых ресурсов. На математическом языке неопределенность целей обычно описывается представлением цели в виде функции со случайными параметрами (или представлением цели как случайной величины). Располагаемые ресурсы обычно описываются некоторым множеством допустимых значений. Неопределенность располагаемых ресурсов в этом случае должна быть описана случайным множеством.

При решении многих прикладных задач необходимо учитывать наличие статистической взаимосвязи между отдельными факторами неопределенности. С информационной точки зрения эта связь определяется через изменение энтропии каждого фактора в результате их взаимного влияния друг на друга. Свойства энтропии, порождаемой случайными величинами, а также применение энтропии случайных величин к исследованию неопределенности экономических процессов к настоящему времени достаточно хорошо изучены. Однако неопределенность, порождаемая случайными точечно-множественными отображениями, изучена значительно меньше. В то же время этот тип неопределенности с прикладной точки зрения не менее значим.

В статье описывается предлагаемый автором метод исследования неопределенности, порождаемой случайными точечно-множественными отображениями, т. е. неопределенности располагаемых ресурсов. Основным инструментом в предлагаемом методе является функция энтропии случайного множества, которая обобщает понятие энтропии случайной величины. На базе функции энтропии определяется функция информационной связи случайных множеств и все другие характеристики.

Ключевые слова: моделирование, случайное множество, информационная связь.

Введение

Множество S подмножеств пространства X называется алгеброй (или булевской алгеброй) в X, если оно замкнуто относительно операций объединения и взятия дополнения, кроме того, $\varnothing, X \in S$. Алгебра S называется σ-алгеброй, если она замкнута относительно счетных объединений.

Измеримым пространством X, или более точно (X, S), называется множество X с выделенной в нем σ-алгеброй S. Множество $E \subseteq X$ называется измеримым, если $E \in S$. Пространством с мерой называется измеримое пространство (X, S) с заданной на S мерой μ, обозначаемое (X, S, μ) или просто X.

Измеримое пространство с мерой (Ω, P, p) называется вероятностным, если $p(\Omega) = 1$.

Минимальная σ-алгебра $S(\tau)$, содержащая топологию τ пространства X, называется Борелевской σ-алгеброй в пространстве X, а всякое множество $B \in S(\tau)$ – Борелевским.

Павлов В. Н. Информационные методы исследования неопределенности в экономических моделях // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Социально-экономические науки. 2015. Т. 15, вып. 1. С. 5–12.

Функция вероятности, функция энтропии

Пусть (Ω, P, p) – вероятностное пространство с вероятностной мерой p, (X, τ) – топологическое пространство с мерой r, заданной на Борелевской σ-алгебре $S(\tau)$. В 2^X с экспоненциальной топологией (μ-топологией, см. [1]) обозначим Борелевскую σ-алгебру $S(\mu)$. Случайным точечно-множественным отображением называется измеримое отображение $\xi : \Omega \to 2^X$.

Рассмотрим отображение $h_x : 2^X \to R,$ определенное формулой

$$h_x(F) = \begin{cases} 1, & if \quad x \in F \\ 0, & if \quad x \notin F \end{cases}.$$

Лемма 1. Пусть X есть T_1-пространство (т. е. каждая точка пространства является замкнутым множеством). Тогда для каждого $x \in X$ отображение h_x измеримо.

Доказательство этой леммы содержится в [2] и здесь не воспроизводится.

Следствие 1. В условиях леммы 1 для каждого $x \in X$ суперпозиция $\eta_x = h_x \circ \xi$ будет случайной величиной, имеющей математическое ожидание $q_\xi(x) = E\eta_x$, причем выполнены неравенства:

$$0 \le q_\xi(x) = E\eta_x = \int_\Omega (h_x \circ \xi)(\omega) dp(\omega) = p\left((h_x \circ \xi)^{-1}(1)\right) \le 1.$$

Число $q_\xi(x) = p\left((h_x \circ \xi)^{-1}(1)\right)$ интерпретируется как вероятность того, что случайный образ $\xi(\omega)$ точечно-множественного отображения ξ накрывает элемент $x \in X$, т. е. $x \in \xi(\omega)$. То же самое число

$$q_\xi(x) = \int_\Omega (h_x \circ \xi)(\omega) dp(\omega)$$

интерпретируется как правдоподобность (математическое ожидание) того, что точка $x \in X$ накрывается образом случайного точечно-множественного отображения ξ. Так как вероятность $q_\xi(x)$ определена для каждого $x \in X$, то можно считать, что задано отображение $q_\xi : X \to [0;1]$.

Две функции $q_\xi^1 = q_\xi$ и $q_\xi^0 = 1 - q_\xi$ будем называть функциями вероятности, порожденными случайным точечно-множественным отображением ξ.

Ясно, что функции q_ξ^1 и q_ξ^0 неотрицательны и справедливо равенство $q_\xi^1 + q_\xi^0 \equiv 1$. Следовательно, для каждого $x \in X$ числа $q_\xi^1(x)$ и $q_\xi^0(x)$ являются распределением вероятностей случайной величины η_x. Энтропия случайной величины η_x вычисляется по формуле Шеннона:

$$H_\xi(x) = -q_\xi^0(x) \cdot \log_2 q_\xi^0(x) - q_\xi^1(x) \cdot \log_2 q_\xi^1(x).$$

Функцию $H_\xi(x)$ будем называть функцией энтропии случайного точечно-множественного отображения ξ.

Свойства функции энтропии $H_\xi(x)$ вытекают из свойств элементарной функции: $y(z) = -z \cdot \ln z$. Если доопределить по непрерывности $y(0) = 0$, то из неравенств $0 < z < 1$ следует $y(z) > 0$. Действительно, $y'(z) = -1 - \ln z$ и при $0 < z < 1/e$ имеем $y'(z) > 0$, следовательно, y в этой области возрастает и положительна, так как $y(0) = 0$. В области $1/e < z < 1$ имеем $y'(z) < 0$, следовательно, y в этой области убывает и положительна, так как $y(1) = 0$.

Значит, для всякого $x \in X$ справедливо неравенство: $H_\xi(x) \geq 0$, т. е. для всякого $x \in X$ функция энтропии неотрицательна. Отметим, что функция энтропии $H_\xi(x)$ равна нулю в точке $x \in X$ в двух случаях: либо $h_x \circ \xi$ тождественно равна нулю, либо $h_x \circ \xi$ тождественно равна единице на всем Ω.

Из неотрицательности функции энтропии $H_\xi(x)$ следует, что интегральная энтропия

$$H(\xi) = \int_X H_\xi(x) dr(x)$$

отображения ξ будет также неотрицательной.

Рассмотрим теперь два случайных точечно-множественных отображения: $\xi, \eta : \Omega \to 2^X$. Совместное поведение отображений ξ и η описывается уже четырьмя совместными функциями вероятности:

$$\begin{aligned}
q_{\xi*\eta}^{11}(x) &= p\left(\Omega_{\xi*\eta}^{11}(x)\right), \text{ где } \Omega_{\xi*\eta}^{11}(x) = \left\{\omega \in \Omega \middle| x \in \xi(\omega) \,\&\, x \in \eta(\omega)\right\};\\
q_{\xi*\eta}^{01}(x) &= p\left(\Omega_{\xi*\eta}^{01}(x)\right), \text{ где } \Omega_{\xi*\eta}^{01}(x) = \left\{\omega \in \Omega \middle| x \notin \xi(\omega) \,\&\, x \in \eta(\omega)\right\};\\
q_{\xi*\eta}^{10}(x) &= p\left(\Omega_{\xi*\eta}^{10}(x)\right), \text{ где } \Omega_{\xi*\eta}^{10}(x) = \left\{\omega \in \Omega \middle| x \in \xi(\omega) \,\&\, x \notin \eta(\omega)\right\};\\
q_{\xi*\eta}^{00}(x) &= p\left(\Omega_{\xi*\eta}^{00}(x)\right), \text{ где } \Omega_{\xi*\eta}^{00}(x) = \left\{\omega \in \Omega \middle| x \notin \xi(\omega) \,\&\, x \notin \eta(\omega)\right\}.
\end{aligned}$$

Справедливы следующие свойства совместных функций вероятности:

1) для всякого $x \in X$ каждая функция $q_{\xi*\eta}^{ij}(x)$, $(i, j = 0,1)$, неотрицательна и $q_{\xi*\eta}^{ij}(x) = q_{\eta*\xi}^{ji}(x)$;

2) для всякого $x \in X$ справедливо равенство $\sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} q_{\xi*\eta}^{ij}(x) = 1$;

3) для всякого $x \in X$ справедливы равенства $\sum_{i=0}^{1} q_{\xi*\eta}^{ij}(x) = q_\eta^j(x)$, $(j = 0,1)$; $\sum_{j=0}^{1} q_{\xi*\eta}^{ij}(x) = q_\xi^i(x)$, $(i = 0,1)$, так что сумма условных вероятностей $q_{\xi|\eta}^{i|j}(x) = q_{\xi*\eta}^{ij}(x) / q_\eta^j(x)$ при каждом j равна единице ($\sum_{i=0}^{1} q_{\xi|\eta}^{i|j}(x) = 1$) и сумма $q_{\eta|\xi}^{j|i}(x) = q_{\xi*\eta}^{ij}(x) / q_\xi^i(x)$ при каждом i также равна единице ($\sum_{j=0}^{1} q_{\eta|\xi}^{j|i}(x) = 1$).

Совместная функция энтропии $H_{\xi*\eta}(x)$ вычисляется по формуле

$$H_{\xi*\eta}(x) = -\sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} q_{\xi*\eta}^{ij}(x) \cdot \log_2 q_{\xi*\eta}^{ij}(x)$$

и является неотрицательной функцией.

Интегральная совместная энтропия $H(\xi * \eta)$ также неотрицательна и равна

$$H(\xi * \eta) = \int_X H_{\xi*\eta}(x) dr(x).$$

Из первого свойства совместных функций вероятности вытекает справедливость равенств

$$H_{\xi*\eta}(x) = H_{\eta*\xi}(x), \quad H(\xi * \eta) = H(\eta * \xi). \qquad (1)$$

Функция информационной связи
случайных точечно-множественных отображений

Определим функцию информационной связи $i_{\xi*\eta}(x)$ случайных точечно-множественных отображений ξ и η в точке $x \in X$ как взаимную информацию случайных величин $h_x \circ \xi$ и $h_x \circ \eta$, вычисленную по формуле (см. [3])

$$i_{\xi*\eta}(x) = H_\xi(x) + H_\eta(x) - H_{\xi*\eta}(x).$$

Из формулы (1) следует, что для всякого $x \in X$ справедливо равенство $i_{\xi*\eta}(x) = i_{\eta*\xi}(x)$. Легко показать, что для всякого $x \in X$ число $i_{\xi*\eta}(x)$ неотрицательно. Это свойство функции информационной связи вытекает из хорошо известного неравенства $\ln x \le x - 1$ в области $x > 0$. Чтобы воспользоваться этим неравенством в доказательстве неотрицательности $i_{\xi*\eta}(x)$, сначала преобразуем его:

1) умножим на –1 и получим $\ln 1/x \ge 1 - x$;

2) сделаем замену переменных $x \to 1/x$ и получим $\ln x \ge 1 - 1/x$ в области $x > 0$.

Теперь, используя свойства логарифмов, преобразуем $i_{\xi*\eta}(x)$ и приведем его к виду:

$$i_{\xi*\eta}(x) = \sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} q_{\xi*\eta}^{ij}(x) \cdot \log_2 \frac{q_{\xi*\eta}^{ij}(x)}{q_\xi^i(x) \cdot q_\eta^j(x)}.$$

Далее, воспользуемся преобразованным неравенством для логарифма $(\ln x \ge 1 - 1/x)$ и получим:

$$\sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} q_{\xi*\eta}^{ij}(x) \cdot \log_2 \frac{q_{\xi*\eta}^{ij}(x)}{q_\xi^i(x) \cdot q_\eta^j(x)} \ge \frac{1}{\ln 2}\sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} q_{\xi*\eta}^{ij}(x) \cdot \left(1 - \frac{q_\xi^i(x) \cdot q_\eta^j(x)}{q_{\xi*\eta}^{ij}(x)}\right) = 0,$$

чем и доказывается неотрицательность функции информационной связи, т. е. неравенство $i_{\xi*\eta}(x) \ge 0$.

Следовательно, неотрицательной будет и интегральная информационная связь отображений ξ и η:

$$\begin{aligned} I(\xi*\eta) &= \int_X i_{\xi*\eta}(x)dr(x) = \\ &= \int_X H_\xi(x)dr(x) + \int_X H_\eta(x)dr(x) - \int_X H_{\xi*\eta}(x)dr(x) = \\ &= H(\xi) + H(\eta) - H(\xi*\eta). \end{aligned}$$

Значимость функции $i_{\xi*\eta}(x)$ заключается в следующем. Информационная связь между отображениями ξ и η в точке x отсутствует $\left(i_{\xi*\eta}(x) = 0\right)$ тогда и только тогда, когда случайные величины $h_x \circ \xi$ и $h_x \circ \eta$ статистически независимы (см. [4]). Если информационная связь между отображениями ξ и η в каждой точке $x \in X$ за исключением множества меры нуль отсутствует, то, согласно теории интегрирования Лебега, $I(\xi*\eta) = 0$. Если же на множестве $A \subseteq X$ положительной меры $i_{\xi*\eta}(x) > 0$, то $I(\xi*\eta) > 0$. Таким образом, величина интегральной информационной связи $I(\xi*\eta)$ может служить показателем силы статистической связи случайных точечно-множественных отображений ξ и η.

Оценка силы статистической связи сверху выполняется следующим образом. Вводится понятие функции условной энтропии:

$$H_{\xi|\eta}(x) = H_{\xi*\eta}(x) - H_\eta(x),$$

так что (с учетом (1)) справедливы равенства

$$i_{\xi*\eta}(x) = H_{\xi}(x) - H_{\xi|\eta}(x) = H_{\xi}(x) + H_{\eta}(x) - H_{\xi*\eta}(x) =$$
$$= H_{\eta}(x) - H_{\eta|\xi}(x) = i_{\eta*\xi}(x).$$

Функции условной энтропии неотрицательны: $H_{\xi|\eta}(x) \geq 0$ и $H_{\eta|\xi}(x) \geq 0.$ Действительно, с учетом свойства 3 распределений вероятностей $q^{ij}_{\xi*\eta}(x)$, $(i, j = 0{,}1)$, имеем:

$$H_{\xi|\eta}(x) = -\sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} q^{ij}_{\xi*\eta}(x)\cdot\log_2 q^{ij}_{\xi*\eta}(x) + \sum_{j=0}^{1} q^{j}_{\eta}(x)\cdot\log_2 q^{j}_{\eta}(x) =$$
$$= -\sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} q^{ij}_{\xi*\eta}(x)\cdot\log_2 q^{ij}_{\xi*\eta}(x) + \sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} q^{ij}_{\xi*\eta}(x)\cdot\log_2 q^{j}_{\eta}(x) =$$
$$= -\sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} q^{ij}_{\xi*\eta}(x)\cdot\log_2\left(q^{ij}_{\xi*\eta}(x)\big/q^{j}_{\eta}(x)\right) =$$
$$= \sum_{j=0}^{1} q^{j}_{\eta}(x)\cdot\left[-\sum_{i=0}^{1} q^{i|j}_{\xi|\eta}(x)\cdot\log_2 q^{i|j}_{\xi|\eta}(x)\right] \geq 0,$$

так как по свойству 3 в квадратных скобках при каждом $x \in X$ стоит неотрицательное число.

Теперь из неотрицательности функции информационной связи $i_{\xi*\eta}(x) \geq 0$ получаем: $H_{\xi}(x) \geq H_{\xi|\eta}(x) \geq 0$ и $H_{\xi}(x) \geq i_{\xi*\eta}(x) \geq 0.$ Таким образом, для функции информационной связи $i_{\xi*\eta}(x)$ справедлива оценка сверху: $\min\{H_{\xi}(x), H_{\eta}(x)\} \geq i_{\xi*\eta}(x) = i_{\eta*\xi}(x) \geq 0,$ причем $H_{\xi}(x) = i_{\xi*\eta}(x)$ тогда и только тогда, когда $H_{\xi|\eta}(x) = 0;$ $H_{\eta}(x) = i_{\xi*\eta}(x)$ тогда и только тогда, когда $H_{\eta|\xi}(x) = 0.$

Воздействие случайного точечно-множественного отображения ξ на случайное точечно-множественное отображение η в точке $x \in X$ определяется величиной статистической связи $i_{\xi*\eta}(x)$.

Из аддитивности интеграла Лебега следует, что для интегральных характеристик справедливо равенство

$$H(\eta|\xi) = \int_X H_{\eta|\xi}(x)\,dr(x) = H(\eta) - I(\xi*\eta).$$

Исходя из сказанного можно сделать следующий вывод. Предположим, что с помощью случайных точечно-множественных отображений ξ и η описывается неопределенность располагаемых ресурсов некоторых экономических объектов Y и Z, которая количественно равна $H(\xi)$ и $H(\eta)$ соответственно. Тогда объединение этих объектов приводит к уменьшению неопределенности располагаемых ресурсов каждого объекта на величину информационной связи $I(\xi*\eta)$.

Пример оценки информационной связи цели и располагаемых ресурсов

Обозначим через Z некоторый экономический объект, в котором X – пространство ресурсов, так что каждая точка $x \in X$ представляет собой набор используемых объектом Z ресурсов; F – пространство целей объекта Z. Предположим, что пространства X, F топологические, измеримые, с Борелевскими мерами r, λ соответственно.

Рассмотрим измеримые отображения:

1) $f : \Omega \to F$, так что для каждого $\omega \in \Omega$ функция $f(\omega) \in F$ является некоторой целью объекта Z;

2) $\xi : \Omega \to 2^X$, так что для каждого $\omega \in \Omega$ множество $\xi(\omega) \in 2^X$ представляет собой множество располагаемых ресурсов объекта *Z*.

Таким образом, отображение $f : \Omega \to F$ определяет случайную цель, отображение $\xi : \Omega \to 2^X$ определяет случайное множество располагаемых ресурсов объекта *Z*.

В примере зададим отображения *f* и ξ следующим образом.

Цель. Предположим, что $F = R^m$, λ – мера Лебега в R^m и *f* – случайный вектор, равномерно распределенный в брусе $B = \left\{ u \in R^m \middle| a_i \le u_i < b_i, \quad i = 1,...,m \right\}$.

Располагаемые ресурсы. Будем считать $X = R^n$ и *r* – мера Лебега в R^n. Рассмотрим линейное отображение $S : R^m \to R^n$ и для каждого $\omega \in \Omega$ определим множество

$$\xi(\omega) = \left\{ x \in R^n \middle| 0 \le x < S\left(f(\omega)\right) \right\}.$$

Интегральная энтропия цели. Преобразуем случайный вектор *f* в случайное точечно-множественное отображение η по методике интервального преобразования случайных величин, разработанной в [2. С. 55–72]. Для этого определим отображение $v : R^m \to 2^{R^m}$ с помощью формулы

$$v(x) = \left\{ t \in R^m \middle| x - \frac{c}{2} \le t < x + \frac{c}{2} \right\},$$

где через c обозначен вектор $c = (c_1,...,c_m)$ с положительными координатами, и положим

$$\eta(\omega) = v\left(f(\omega)\right).$$

Отметим, что если $x \in B_0$, где $B_0 = \left\{ u \in R^m \middle| a_i + c_i/2 \le u_i < b_i - c_i/2, \quad i = 1,...,m \right\}$, то

$$q_\eta(x) = q_0 = \prod_{i=1}^{m} c_i \Big/ \prod_{i=1}^{m} (b_i - a_i) \le 1.$$

Следовательно, $H_\eta(x) = H_0$, где $H_0 = -q_0 \cdot \log_2 q_0 - (1 - q_0) \cdot \log_2 (1 - q_0)$. Далее, если $x \notin B_c$, где $B_c = \left\{ u \in R^m \middle| B \cap v(u) \ne \varnothing \right\}$, то $q_\eta(x) = 0$. Если же $x \in B_c \setminus B_0$, то $0 < q_\eta(x) < q_0$. Следовательно, интегральная энтропия $H(\eta)$ вычисляется через интеграл Лебега по ограниченному (измеримому) множеству:

$$H(\eta) = \int_{B_c} H_\eta(x) dx.$$

Так как для каждого $x \in B_c$ выполнены неравенства $0 \le H_\eta(x) \le 1$, то $H(\eta) \le \lambda(B_c) < \infty$.

Интегральная энтропия располагаемых ресурсов. Обозначим через R_+^n конус неотрицательных элементов R^n и $\Omega_0 = \left\{ \omega \in \Omega \middle| Sf(\omega) \notin R_+^n \right\}$. Тогда будет справедливо равенство $\Omega_0 = \left\{ \omega \in \Omega \middle| \xi(\omega) = \varnothing \right\}$. Следовательно, если $p(\Omega_0) = \; = p_0$, то для каждого $x \in R^n$ функция вероятности $q_\xi^1(x)$ не превосходит $1 - p_0$, т. е. $q_\xi^1(x) \le 1 - p_0$, причем $q_\xi^1(0) = 1 - p_0$. Далее, если положить $D = \bigcup_{y \in B} \left\{ x \in R^n \middle| 0 \le x < Sy \right\}$, то при $x \notin D$ справедливо равенство $q_\xi^1(x) = 0$, из которого следует $H_\xi(x) = 0$. Множество *D* ограничено в R^n, так как для каждого $x \in D$ справедливо неравенство $\|x\| \le \|S\| \cdot \|y\|$, где $y \in B$. Следовательно,

$$\sup_{x \in D} \|x\| \le \|S\| \cdot \max_{y \in B} \|y\| < \infty.$$

Так как множество D ограниченное, измеримое по Лебегу и $0 \le H_\xi(x) \le 1$, то для интегральной энтропии

$$H(\xi) = \int_D H_\xi(x)\,dx$$

получаем неравенство $H(\xi) \le r(D) < \infty$.

Таким образом, интегральная информационная связь $I(\xi * \eta)$ между целью и располагаемыми ресурсами конечна, так как, по сказанному выше, справедливо неравенство $I(\xi * \eta) \le \min\{H(\xi), H(\eta)\}$, причем взаимное влияние цели и располагаемых ресурсов объекта Z приводит к уменьшению интегральной энтропии цели и ресурсов на величину интегральной информационной связи $I(\xi * \eta)$.

Список литературы

1. *Куратовский К.* Топология: Пер. с англ. М.: Мир, 1968. Т. 1–2.
2. *Павлов А. В.*, *Павлов В. Н.* Нечетко-случайные методы исследования неопределенности и их макроэкономические приложения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 185 с.
3. *Павлов В. Н.* О некоторых математических свойствах энтропии и информации // Анализ и прогнозирование экономических процессов. Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2006. С. 223–230.
4. *Корн Г.*, *Корн Т.* Справочник по математике. М.: Наука, 1977.

Материал поступил в редколлегию 20.07.2014

V. N. Pavlov

St.-Petersburg State University of Trade and Economics
50 Novorossiyskaya Str., Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation

victor_n_pavlov@mail.ru

INFORMATION METHODS OF INVESTIGATION OF UNCERTAINTY IN ECONOMIC MODELS

In innovation processes play an important role are two types of uncertainty: uncertainty of goals and uncertainty of available resources. In mathematical language uncertainty of goals is usually described as a representation of the target function with random parameters (or a representation of the target as a random variable). The available resources are usually described by a set of valid values. Uncertainty of the resources in this case must be described by a random set.

When dealing with many applications, be aware of the statistical relationship between the individual uncertainties. From the information point of view, this relationship is determined by a change in the entropy of each factor as a result of their mutual influence on each other.

Properties of the entropy generated by the random variables, by now fairly well-known Application of entropy of random variables to study the uncertainty of economic processes is contained. However, the uncertainty generated by the random point-set maps, studied far less. At the same time, this type of uncertainty from the applied point of view is not less important.

This article describes the method proposed by the authors study the uncertainty generated by the random point-set mappings, i.e. uncertainty of available resources. The main tool in the proposed method is a function of the entropy of the random set, which generalizes the notion of entropy of a random variable. On the basis of the entropy function is determined by the function of information link of random sets and all other features.

Keywords: modeling, random set, information communication.

References

1. Pavlov V. N. On some mathematical properties of entropy and information. *Economic analysis and forecasting of the processes*. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS IEIE, 2006, p. 223–230.

2. Kuratowski K. Topology. Moscow, Mir, 1968, vol. 1–2.

3. Pavlov A. V., Pavlov V. N. *Fuzzy-random methods of investigation of uncertainty and macroeconomic applications*. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 2012, 185 p.

4. Korn G., Korn T. *Mathematical Handbook*. Moscow, Nauka, 1977.