

УДК 303.732.4 62-50 519.246.8 519.816

ЭНТРОПИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ КАК МЕРА РИСКА**В.В. Карасев (Санкт-Петербург)**

Существует достаточно большое количество определений понятия «риск» и величин его измерения, как количественных, так и качественных метрик. Чаще всего риск представляется вероятностью наступления нежелательного события, величиной прогнозируемого ущерба, математическим ожиданием величины убытка (потерь), распределением убытков, среднеквадратичным отклонением величины дохода, выпуклостью нелинейной функции зависимости между ценой облигации и ее доходностью, классом опасности (надежности) и пр.

В нашей работе мы развиваем идеи, опубликованные в трудах [1-6], и предлагаем величину энтропии как еще одну количественную меру риска для оценки состояния сложных систем различной природы.

Но, прежде чем переходить к изложению концепции энтропии как меры риска, рассмотрим несколько основных ключевых положений, затрагивающих связь между энтропией и другими фундаментальными характеристиками сложных систем, такими как риск и безопасность.

Энтропия является мерой неопределенности или хаоса в системе.

В термодинамике, как показано в работе [8], энтропия характеризует степень беспорядка в физической системе (чем выше энтропия, тем менее упорядочена система).

В теории информации энтропия измеряет количество информации или неопределенности в сообщении [9]. Если появление символа (или комбинации символов) в сообщении предсказуемо, то энтропия сообщения низкая; если появление символа случайно, энтропия высокая.

В биологических системах энтропия может служить показателем разнообразия, в частности, в работе [10] Р. Макартур применил формулу энтропии Шеннона для исследования пищевых сетей.

Т. е. энтропия является ключевой характеристикой, которая помогает описать, насколько «случайна» или «не упорядочена» система.

С точки зрения более абстрактного мышления энтропия символизирует баланс между порядком и хаосом. Полностью устранить хаос невозможно (это противоречило бы второму закону термодинамики), но управление энтропией позволяет найти оптимальное соотношение между риском и безопасностью.

Например, в случае полного порядка (низкая энтропия) система становится слишком консервативной и «жесткой», что может привести к проблемам ее функционирования при изменении условий.

В случае полного хаоса (высокая энтропия) система теряет способность функционировать корректно в соответствии с заданными условиями функционирования.

Идеальная система должна находиться где-то посередине, поддерживая динамический баланс.

В свою очередь, риск можно определить как вероятность возникновения нежелательных событий и их последствий. Энтропия тесно связана с риском, потому что неопределенность является источником риска – высокая энтропия системы означает высокую неопределенность, что увеличивает вероятность непредсказуемых событий. Например, если вы управляете сложной технической системой, где много взаимодействующих компонентов с неизвестными состояниями, то риски сбоев или аварий возрастают.

Через снижение энтропии можно управлять риском – нужно уменьшить неопределенность, чтобы снизить риск. Этого можно достигнуть за счет сбора данных, анализа, моделирования и внедрения контроля. Например, в финансах использование статистических моделей помогает прогнозировать рыночные колебания, снижая энтропию и, следовательно, риск.

Теперь рассмотрим понятие безопасности. Безопасность является состоянием, при котором риски минимизированы, а система находится под контролем.

Связь между безопасностью и энтропией можно описать так: высокая энтропия = низкая безопасность. Когда система неупорядочена, или плохо понятна, она становится уязвимой для внешних воздействий или внутренних сбоев. Например, если в компьютерной сети много неизвестных устройств или открытых портов, энтропия возрастает, и сеть становится менее безопасной.

Низкая энтропия = высокая безопасность: упорядоченные, контролируемые системы легче защитить. Например, четкие правила доступа, регулярные проверки и ограничение действий пользователей снижают энтропию и повышают безопасность.

Таким образом, общую связь между понятиями можно представить следующим образом: Риск ↔ Безопасность ↔ Энтропия.

Между этими тремя понятиями существуют следующие обратные зависимости:

- риск прямо пропорционален энтропии: чем больше неопределенность, тем выше риск;
- безопасность обратно пропорциональна энтропии: чем меньше хаоса, тем выше уровень безопасности;
- риск и безопасность находятся в противоположных полюсах: чем ниже риск, тем выше безопасность.

Говоря об этих зависимостях, можно сослаться на следующие примеры из реальной жизни:

- Кибербезопасность. Если в сети много неизвестных устройств, протоколов или процессов (высокая энтропия), риск атак возрастает, а безопасность снижается; но использование инструментов мониторинга и контроля (например, фаерволлов, антивирусов) снижает энтропию, уменьшает риск и повышает безопасность;
- Финансовые рынки. Высокая волатильность (энтропия) увеличивает риск потерь для инвесторов; использование диверсификации и хеджирования помогает снизить энтропию и, соответственно, риск;
- Технические системы. В самолетах или ядерных реакторах любое отклонение от нормального режима работы (увеличение энтропии) может привести к аварии; поэтому применяются строгие протоколы контроля и мониторинга.

Следовательно, энтропия служит мостом между риском и безопасностью – чем она выше, тем больше риск и ниже безопасность.

Если же в контексте данной триады рассмотреть еще надежность, то получается следующая картина.

Под надежностью принято понимать способность системы выполнять свои функции в течение определенного времени при заданных условиях. Она часто оценивается через такие характеристики, как безотказность (вероятность того, что система не выйдет из строя), долговечность (время, в течение которого система сохраняет работоспособность), ремонтпригодность (способность быстро восстанавливаться после сбоев).

Таким образом, надежность напрямую связана с управлением рисками и поддержанием безопасности.

Энтропия отражает уровень хаоса или неопределенности в системе. Надежность же демонстрирует, насколько система устойчива к этим хаотическим воздействиям.

При высокой энтропии имеем низкую надежность. Если система характеризуется высокой неопределенностью (например, много неизвестных факторов, случайных событий или сложных взаимодействий), то вероятность отказов возрастает. Это снижает надежность.

При низкой энтропии надежность высока. Упорядоченные, предсказуемые системы легче контролировать, что увеличивает их надежность. Например, четко организованные производственные процессы или технические системы с минимальным количеством неопределенностей обычно более надежны.

Надежность играет центральную роль в обеспечении безопасности и минимизации рисков. Далее сказано, как она связана с этими понятиями.

Надежность и безопасность. Безопасность зависит от того, насколько система может противостоять внешним и внутренним угрозам. Надежные системы лучше справляются с такими угрозами, потому что они менее подвержены отказам и сбоям. Пример: в авиации надежность двигателей самолета прямо влияет на безопасность полетов. Чем выше надежность, тем ниже вероятность аварии.

Надежность и риск. Риск связан с вероятностью возникновения нежелательных событий. Надежные системы снижают эту вероятность, потому что они реже выходят из строя. Пример: в энергетике надежность оборудования снижает риск аварий, таких как перегрев реактора или короткое замыкание.

Можно представить взаимосвязь между надежностью, безопасностью, риском и энтропией в виде следующих зависимостей:

- надежность обратно пропорциональна энтропии; чем ниже энтропия (меньше хаоса), тем выше надежность системы;
- безопасность прямо пропорциональна надежности; надежные системы обеспечивают более высокий уровень безопасности;
- риск обратно пропорционален надежности; чем ниже надежность, тем выше риск отказов и связанных с ними последствий.

Далее три примера из реальной жизни.

Инженерные системы. В автомобильной промышленности надежность тормозной системы напрямую влияет на безопасность водителя и пассажиров. Если тормозная система ненадежна (высокая энтропия), то риск аварии возрастает. Для повышения надежности используются регулярные проверки, тестирование материалов и контроль качества.

Кибербезопасность. В компьютерных сетях надежность программного обеспечения и аппаратных компонентов снижает риск атак. Например, использование хорошо протестированных алгоритмов шифрования делает систему более устойчивой к взломам. Снижение энтропии (путем ограничения неизвестных устройств или процессов) повышает надежность сети.

Медицина. В медицинских устройствах, таких как кардиостимуляторы, надежность критически важна для безопасности пациента. Отказ устройства может привести к летальному исходу. Поэтому снижение энтропии (через строгие стандарты производства и тестирования) повышает надежность и безопасность.

Надежность можно рассматривать как механизм управления энтропией. Вот как это работает:

- снижение энтропии через проектирование: при создании системы инженеры стремятся минимизировать неопределенность, используя стандартизированные компоненты, четкие протоколы и резервирование; это повышает надежность;
- мониторинг и контроль: постоянный мониторинг состояния системы помогает обнаруживать и устранять источники хаоса (например, износ деталей или ошибки в программном коде); это также увеличивает надежность;

– адаптивность: надежные системы могут адаптироваться к изменениям, сохраняя свою работоспособность даже при росте энтропии.

В качестве меры риска в работах [11,12] предлагается вероятность нежелательного события (отказа, аварии, катастрофы, фиаско, финансовых потерь и т. п.), которую можно рассчитать, построив дерево событий, представляющее собой ориентированный граф с вершинами (событиями) и дугами (причинно-следственными связями между событиями). Построение деревьев событий (сценариев развития опасного состояния) является основой широко распространенных методов оценки и анализа надежности – логико-вероятностного метода (ЛВМ) И.А. Рябина [12] и метода деревьев отказов (ФТА) Х. Ватсона [13].

События, не имеющие входящих дуг, являются инициирующими событиями (обозначим их множеством **I**), а события, не имеющие исходящих дуг, являются конечными событиями (множество **F**), остальные события называются производными (множество **D**).

Вероятности инициирующих событий определяются экспериментальным путем, либо на основе экспертных оценок. Вероятности событий, принадлежащих множествам **F** и **D**, рассчитываются по формулам расчета вероятностей, определенных аксиоматикой А.Н. Колмогорова [14]. После построения дерева событий и расчета вероятностей событий множества **F**, можно сделать вывод об уровне надежности, безопасности, либо величине риска функционирования сложной системы. Рассчитав вклады событий множества **I** в вероятности событий множества **F** (на плюс, минус, либо величину их структурной значимости), можно выявлять критические элементы и события, приводящие к отказу (коллапсу, фиаско, аварии) системы, делать выводы и принимать решения по управлению безопасностью или риском, либо вырабатывать меры по повышению надежности системы.

С точки зрения отдельного риск-менеджера или специалиста по управлению надежностью и безопасностью, события множества **F**, чья вероятность близка к границам интервала $[0;1]$, являются наиболее вероятными, следовательно, к их наступлению можно подготовиться заранее, например, принять меры по их недопущению, либо смягчению последствий их наступления. Например, в случае технических систем можно провести внеплановое техническое обслуживание с заменой критических элементов системы или их ремонту, в случае экономических систем можно прибегнуть к страхованию рисков либо их хеджированию. Однако в любом случае проводимые меры требуют дополнительных накладных расходов, приводят к потере времени, простоя системы (в случае производственных систем), уменьшению прибыли.

Сложнее обстоит дело с событиями множества **F**, чья вероятность близка к значению в середине диапазона $[0;1]$, т.е. событиями, характеризующимися непредсказуемостью и высокой неопределенностью их наступления. Для таких событий характерно высокое значение единичной энтропии, вычисляемой как функция от вероятности наступления p по формуле:

$$H_e = -(p \cdot \ln p + (1 - p) \cdot \ln(1 - p)) \quad (1)$$

Исходя из формулы (1) значение единичной энтропии стремится к нулю на границах интервала $[0;1]$ и к своему максимуму в середине интервала. График зависимости H_e от p приведен на рис. 1.

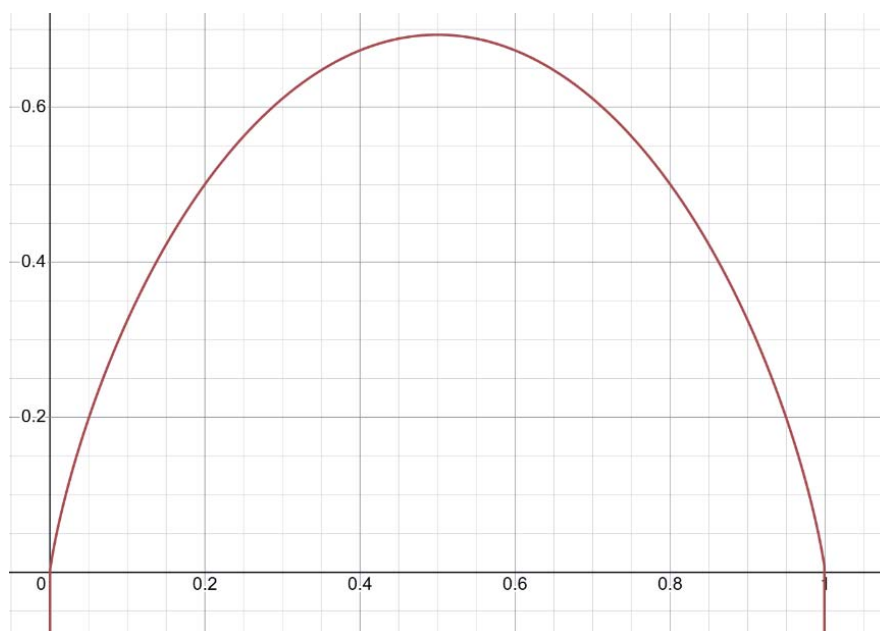


Рис. 1. Зависимость единичной энтропии H_e от вероятности события

В работе [15] обоснована целесообразность интервальных оценок вероятности нежелательного события $p \in [p_{\min}, p_{\max}]$ с тем, чтобы преодолеть основное ограничение методов ФТА и ЛВМ – требование независимости событий множества I .

В этом случае получаем интервальную оценку единичной энтропии $H_{e \text{ int}}$, вычисляемую по следующей формуле:

$$H_{e \text{ int}} = [-(p_{\min} \cdot \ln p_{\min} + (1 - p_{\min}) \cdot \ln(1 - p_{\min})); \\ -(p_{\max} \cdot \ln p_{\max} + (1 - p_{\max}) \cdot \ln(1 - p_{\max}))] \quad (2)$$

В случае итерационного моделирования интервальных вероятностей нежелательных событий в качестве интервального значения энтропии принимаем значение, обладающее минимально узким интервалом.

Использование энтропии как меры риска рассмотрим на нескольких практических примерах.

Пример 1. Энтропия как мера операционного риска сложной системы

Операционный риск, его свойства, а также методы его оценки описаны во многих научных работах, например, в [16, 17, 18], а также в документах регуляторов, в частности, Базельского Комитета по банковскому надзору [19].

В своем исследовании мы исходим из следующих постулатов:

1. операционный риск является не финансовым, а системным риском любого субъекта экономики;
2. феномен операционного риска заключается в его сложной формализации, он недоступен для моделирования большинством математических методов и методов имитационного моделирования;
3. операционный риск проявляется в нежелательных событиях, причины которых могут иметь любую природу. Следовательно, он может быть описан двумя численными характеристиками – вероятностью нежелательного события (число в интервале $[0, 1]$) и величиной ущерба (выражается в денежном эквиваленте, является действительным положительным числом);
4. операционный риск является динамической величиной.

Функционирование любой сложной системы можно описать динамической последовательностью множества событий, происходящих на этом субъекте. Для целей

оценки и управления операционным риском из всего множества Ω возможных событий мы выбираем лишь те элементарные события¹, которые характеризуют успешное выполнение рабочих процедур (действий, операций), направленных на достижение поставленных целей и являющихся смыслом существования предприятия. Множество Ξ таких событий является замкнутым конечным множеством, $\Xi \subseteq \Omega$. Множество Ξ практически неизменно, оно подлежит изменению в случае изменения деятельности предприятия и происходящих на нем бизнес-процессов.

Каждый процесс в системе может выполняться в конкретный момент времени, т. е. быть *активным процессом*. Процессы могут выполняться последовательно или параллельно во времени. На момент времени t могут быть активными n процессов.

Совокупность активных процессов определяет *текущий операционный риск* системы $P(Y)$ в момент времени t , точнее, его определяет совокупность операций (процедур, действий) всех параллельных процессов, успешное завершение которых ожидается к текущему моменту времени t .

Обобщенная структурная модель операционного риска представлена на рис. 2. Она представляет собой *сценарий* возникновения нежелательного события (дерево событий) и является ориентированным графом $G(V, S)$, где V – количество вершин, S – количество связей. Вершина Y соответствует нежелательному событию (ущерб вследствие операционного риска), $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ – независимые случайные события из множества Ξ .

Расчет величины $P(Y)$ осуществляется в соответствии с методами расчета деревьев отказов, изложенными в работе [20].

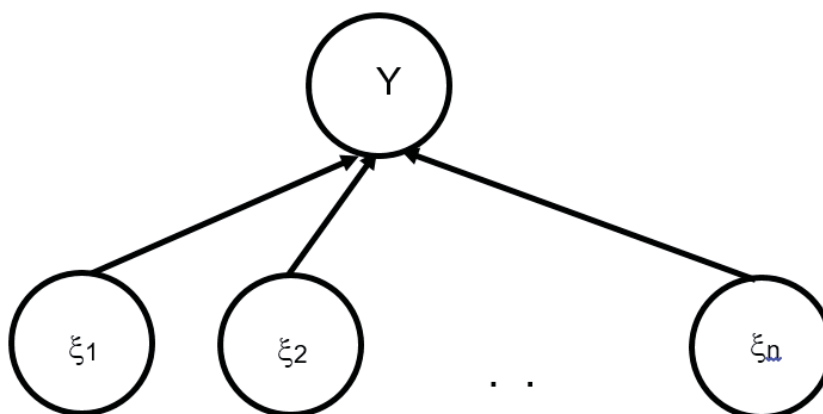


Рис. 2. Обобщенная структурная модель операционного риска предприятия

В каждый момент времени t мы имеем множество E иницирующих событий $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, соответствующих успешному завершению текущих элементарных процедур (операций, действий) процесса. В различные последовательные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_k$ множество E будут составлять разные события и их количество также будет разным, то есть мощность множества E меняется со временем: $|E_1|, |E_2|, \dots, |E_k|$. Это можно наглядно демонстрировать на временных диаграммах потока событий предприятия, примеры таких диаграмм приведены в [6], [21].

Учитывая, что количество событий $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ в дереве на рис. 2 постоянно меняется, то с течением времени мы наблюдаем динамическое изменение графа, т.е. граф $G(V, S)$ является случайным графом с заданной структурой связей (n иницирующих

¹ Элементарными событиями мы называем случайные события, соответствующие успешному завершению простейшего неделимого действия (операции, процедуры) процесса. Элементарные события нецелесообразно разбивать на события, являющиеся по отношению к исходному событию иницирующими, так как нецелесообразно разбивать операцию (процедуру, действие) процесса.

вершин и одна производная), то есть $V = n + 1$, $S = n$, и граф можно обозначить $G(n+1, n)$.

Рассматриваемый граф соответствует модели случайного графа Гильберта, в котором каждые новые вершины (а, следовательно, и новые ребра) добавляются с вероятностью $0 \leq p \leq 1$. При этом граф $G(V, S)$ является конечным, так как множество Ξ конечно.

Для управления безопасностью и риском наиболее примечательными являются такие комбинации событий $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, которые характеризуются высокой энтропией, т. е., согласно формуле (1) (или формуле (2) в зависимости от постановки задачи), нас интересуют такие комбинации событий, в которых вероятность реализации по меньшей мере одного события близка к 0.5.

Диаграммы событий позволяют предсказывать возникновение отказа (аварии, фиаско) вследствие воздействия латентных факторов, скрытой деградации или неучтенных ошибок в функционировании, которые приводят к возникновению критических комбинаций событий и «критических точек» системы, т. н. «дырок швейцарского сыра» в системе¹.

При комбинации событий, дающих высокий или низкий риск, действия риск-менеджера понятны. Низким риском можно пренебречь (особенно, если величина ожидаемых потерь низкая), при высоком риске нужно разнести выполнение операций процессов во времени, чтобы критическая комбинация не образовалась. В случае же высокой энтропии очень сложно дать какие-либо рекомендации; важную роль в принятии решения играет опять же величина ожидаемых потерь. Т. е. с точки зрения риск-менеджера величина энтропии может быть использована как количественная мера операционного риска.

Пример 2. Энтропия как мера надежности информационной системы

В нашем исследовании мы использовали реальные статистические данные по отказам информационной системы, связанные с обслуживанием абонентов. Статистические данные представлялись таблицей инцидентов, в которой устанавливались время отказа, причина отказа, регистрационные данные и сведения о нарушении параметра уровня обслуживания абонентов (SLA). С учетом этого параметра и статистики инцидентов принимались решения об установке параметров процедур резервного копирования и восстановления: допустимая точка восстановления (RPO); время восстановления (RTO); максимально допустимое время простоя (MTOD).

Инцидент в информационной системе является событием отказа обслуживания для отдельного абонента.

Данные предоставлялись за три месяца функционирования системы, суточный временной интервал разбивался по часам, для каждого часа рассчитывалась частота инцидентов. Распределение частот инцидентов в течение суток представлено на рис. 3.

¹ «Дырки швейцарского сыра» в производственных системах – это метафора модели Дж. Рисона (*J. Reason*) для объяснения причин аварий. Метафора подразумевает, что происшествия возникают не из-за одной крупной ошибки, а из-за множества мелких, случайно расположенных уязвимостей («дырок») в разных уровнях защиты системы, которые в совокупности приводят к единой точке отказа. С концепцией можно ознакомиться в [22].

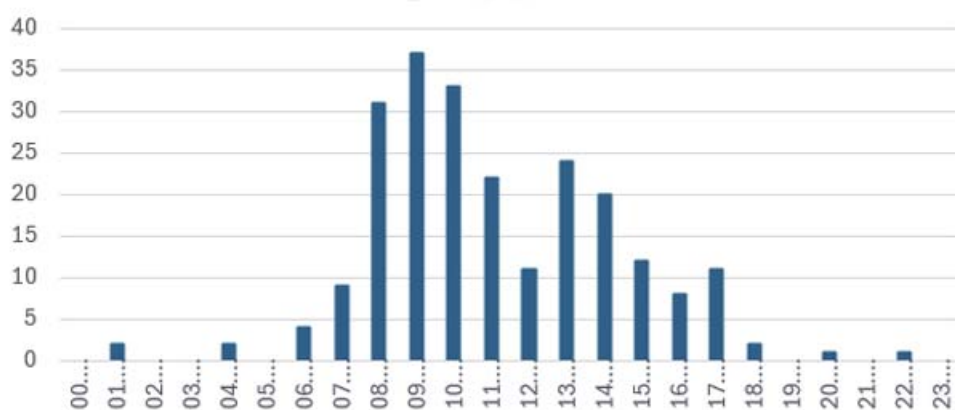


Рис. 3. Почасовое распределение инцидентов информационной системы в течение суток

Данное распределение демонстрирует нам изменение интенсивности отказов в течение суток в зависимости от количества подключенных абонентов и, соответственно, нагрузки на сервер. В выходные дни частоты инцидентов по часам ниже, но, в целом, подобны распределению на рис. 3. Мы видим, что пик инцидентов возникает в интервале от 08.00 до 12.00 и от 13.00 до 15.00.

Исходя из полученной гистограммы, несложно оценить вероятность инцидентов и надежность системы.

Если рассчитать частоты инцидентов по часам для всего временного периода наблюдений, то получаем похожее распределение на рис. 4.

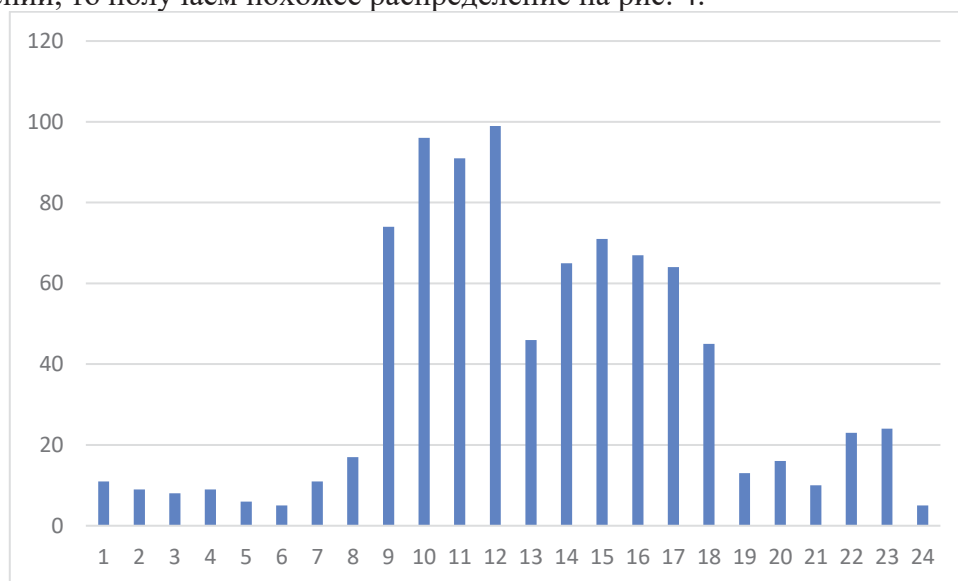


Рис. 4. Почасовое распределение инцидентов информационной системы в течение наблюдаемого периода (3 месяца)

Большое количество инцидентов по всей выборке наблюдается с 09.00 до 19.00, но максимум инцидентов наблюдается с 07.00 до 09.00 и с 22.00 до 24.00, что объясняется повышенной нагрузкой на систему в эти периоды (с системой работает много абонентов). На других временных интервалах также наблюдается увеличение инцидентов.

Для каждого часового интервала по всей выборке наблюдений мы построили временные ряды значений числа инцидентов, разбили их на интервалы, согласно формуле Стерджесса [23], и рассчитали значения энтропии Реньи и энтропии Шеннона.

Максимальные значения энтропия Реньи показала для инцидентов, произошедших с 07.00 до 08.00 (1,699799), с 18.00 до 19.00 (1,808848) и с 23.00 до 00.00

(1,517171). Максимум энтропии Шеннона пришелся на интервалы с 07.00 до 09.00 (1,838328 и 1,658646), с 18.00 до 19.00 (1,883487) и с 23.00 до 00.00 (1,615992). Обратим внимание, что временные интервалы с высокой энтропией лишь частично совпадают с интервалами с максимальным количеством инцидентов.

Высокий уровень энтропии свидетельствует о высокой неопределенности уровня нагрузки информационной системы в данные временные интервалы, и, следовательно, в пределах этих интервалов трудно спрогнозировать отказы.

Поскольку в периоды низкой энтропии нагрузка на информационную систему более предсказуема (меньше неопределенность), то с точки зрения управления надежностью можно принять своевременные меры для профилактики отказов, например, путем репликации данных, масштабирования системы и прочими действиями технического характера.

В периоды высокой энтропии надежность информационной системы снижается, так как нагрузка остается неопределенной, что ведет к неопределенности по поводу принятия мер, повышающих надежность.

Таким образом, величина энтропии может служить показателем надежности системы.

Пример 3. Энтропия как показатель экономической безопасности социально-экономической системы

В работе [2] представлены результаты научного исследования энтропии основных фондовых индексов. В этом исследовании применен расчет энтропии, использующий невероятностные меры для входных параметров.

Для экономических систем это вполне обычный прием, когда в качестве входных параметров для расчета энтропии используют детерминированные значения конкретных экономических параметров. В работе [24] эта особенность рассматривается в динамических процессах экономических систем, связанных с движением денежных средств. Согласно выводам автора, что энтропия в экономике связана с полезностью товаров (услуг) и производственными факторами. Энтропия является неотъемлемым свойством производственных процессов, участвует в товарообороте и оказывает прямое влияние на реальные деньги. В этой работе приводится также ряд формул для расчета различных видов энтропии с детерминированными параметрами.

Джон Брайант в работе [25] приводит формулу для расчета энтропии экономической системы, основанную на семантике формулы энтропии Больцмана, но использующую в качестве аргумента не статистический вес, а отношение величины экономической деятельности V к величине, ограничивающей эту деятельность X :

$$S = \ln\left(\frac{V}{X}\right) \quad (3)$$

Для расчета энтропии временных рядов экономических показателей также могут применяться детерминированные величины. Например, в работе [26] производится расчет энтропии Гроссбергера-Прокаччия (аргументами являются объем выборки и расстояние между членами ряда – евклидова норма) для временного ряда и последующее сравнение полученных значений энтропии с величинами текущей волатильности ряда; также проведен корреляционный анализ, показавший высокую корреляцию волатильности и энтропии. Там же отмечается, что в отличие от энтропии Шеннона, требующей большого количества исходной информации (сотни тысяч членов временных рядов) для получения адекватных результатов расчетов, энтропия Гроссбергера-Прокаччия требует гораздо меньшего количества исходной информации для расчетов.

В работе [27] на стр. 6 приводится формула расчета информационной энтропии Ферми-Дирака для доходности портфеля ценных бумаг, использующая в качестве

аргументов детерминированные величины стоимости активов и «емкостей активов», выражающих максимально возможную стоимость в течение заданного периода времени.

Расчет энтропии фондовых индексов в работе [2] охватывал десятилетний период, включающий как относительно стабильные периоды, так и периоды высокой турбулентности рынка, включая пандемию коронавируса в феврале-марте 2020 г. и события февраля 2022 г., связанные с началом специальной военной операции.

По результатам вычислений был сделан вывод о применимости значений энтропии фондовых индексов для оценки уровня экономической безопасности.

Энтропия фондовых индексов возрастает во время рыночных шоков, что свидетельствует о росте неопределенности. Сравнение значений энтропии фондовых индексов национальной экономики со значениями энтропий индексов других экономик позволяет провести сравнительный анализ и дает объективную картину устойчивости национальной экономики. Также энтропия характеризует гомогенность экономики, например, малые значения энтропии свидетельствуют о схожих макроэкономических показателях различных субъектов экономики. Высокая величина энтропии, напротив, говорит о неравномерности развития различных секторов экономики.

В заключении следует отметить, что энтропия является системным свойством и объективным показателем неопределенности.

С точки зрения практического применения, оценка риска на основе энтропии отличается простотой и прозрачностью получаемых результатов и может быть применена не только риск-менеджерами, но и проектировщиками, специалистами регуляторных органов, инвесторами, рыночными аналитиками, менеджерами высшего и среднего звена для принятия обоснованных решений. Энтропия также хорошо подходит для оценки состояния системы в динамике, что часто является настоящей головной болью риск-менеджеров и инженеров по безопасности.

Основной недостаток подобной оценки риска связан с субъективностью выбора меры, на основании которой производится расчет. Энтропия существует объективно, но выбор способа расчета энтропии производится субъективно, в зависимости от принятой вероятностной меры, выбор которой производится чаще всего в соответствии с предпочтениями исследователя, реже – продиктован способом постановки задачи и характером исходных данных.

Литература

1. **Карасев В.В., Карасева Е.И.** Оценка неопределенности состояния российской экономики на основе энтропии фондового индекса РТС // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем: сборник научных трудов XVII Международной школы-симпозиума АМУР-2023, Симферополь–Судак, 14-27 сентября 2023 / ред. совет: А. В. Сигал (предс.) и др. – Симферополь : ИП Корниенко А. А., 2023. Стр. 181-186.
2. **Карасев В.В., Карасева Е.И.** Энтропия основных фондовых индексов как показатель неопределенности состояния экономики. // Экономика. Право. Инновации, Издательство университета ИТМО, № 4. 2023, С. 4-16. DOI: 10.17586/2713-1874-2023-4-4-16.
3. **Карасев В.В.** Оценка качества продукции и состояния производственных систем на основе энтропии // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : III Международный форум (Санкт-Петербург, 8 ноября 2023 г.): сборник тезисов докладов : в 2 ч. Ч. 2 / С.-Петерб. гос. ун-т аэрокосм. приборостроения ; оргком (пред.) Ю. А. Антохина ; оргком: А. А. Оводенко [и др.]. - Санкт-Петербург : Изд-во ГУАП, 2023. С. 228-230.

4. **Карасев В.В., Карасева Е.И.** Энтропийный подход к прогнозированию прибыли от реализации инновационных продуктов и услуг в Северо-Западном федеральном округе Российской Федерации // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2024. № 3 (78). С. 132-139. DOI: 10.52897/2411-4588-2024-3-132-139.
5. **Карасев В.В., Карасева Е.И.** Метод оценки степени диверсификации экономики на основе энтропии экономических связей // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем: сборник научных трудов XVIII Международной школы-симпозиума АМУР-2024, Симферополь–Судак, 14-27 сентября 2024 / ред. совет: А. В. Сигал (предс.) и др. – Симферополь : ИП Корниенко А. А., 2024. С. 185-189. ISBN 978-5-6051184-7-3.
6. **Karasev V., Karaseva E.** Process-Event Approach for Operational Risk Estimation / Environment. Technology. Resources // Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference, June 20-22, 2019, Rezekne, Latvia, Vol. II, pp. 70-73.
7. **Karaseva E.** Process-event method for operational risk assessment at enterprise / International Journal of Risk Assessment and Management, 2022 Vol.25 No.1/2, p 67-83, DOI: 10.1504/IJRAM.2022.128708.
8. **Martin J.L.** Theories of Disorder and Order, Energy and Information, in Sociological Thought. Philos. Trans A Math Phys Eng Sci., 2023, Oct 2; 381(2256): 20220292. DOI: 10.1098/rsta.2022.0292.
9. **Natal, J.; Avila, I.; Tsukahara, V.B.; Pinheiro, M.; Maciel, CD.** Entropy: From Thermodynamics to Information Processing. Entropy, 2021, 23, 1340. <https://doi.org/10.3390/entropy231013402>.
10. **MacArthur R.H.** Fluctuations of animal populations, and measure of community stability Архивная копия от 12 ноября 2013 на Wayback Machine // Ecology. 1955. V. 36. № 7. P. 353-356.
11. **Соложенцев Е.Д.** Основы событийного управления качеством экономики, государства и жизни человека. – СПб: Наука, 2021, 175 с.
12. **Рябинин И.А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПбГУ. 2007. 276 с.
13. **Watson H.A.** Launch control safety study. Section VII, vol. 1., Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey, USA, 1961.
14. **Kolmogorov A.N.** Foundations of the Theory of Probability. Chelsea Publishing Company, New Yourk, 1956, 84 p.
15. **Карасев В.В.** Адаптация метода ФТА для оценки и анализа безопасности и риска в социально-экономических системах // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем: сборник научных трудов XV Всероссийской с международным участием школы-симпозиума АМУР-2021, Симферополь-Судак, 14-27 сентября 2021 / ред. совет: А. В. Сигал (предс.) и др. – Симферополь : ИП Корниенко А.А., 2021. С. 178-190. ISBN 978-5-6046168-1-9.
16. **Kaspereit T., Lopatta K., Pakhchanyan S., Prokop J.** Systemic operational risk / Journal of Risk Finance. – Vol. 18, Issue 3. 2017. – pp. 252-262.
17. **McKim V.L.** Operational risk assessment / Journal of Business Continuity & Emergency Planning. – Vol. 10, Issue 4. – Summer, 2017. – pp. 339-352.
18. **Panjer H.H.** Operational Risk: Modeling Analytics. – Wiley, 2006. – 448 p.
19. International Convergence of Capital Measurement and Capital Standards: A Revised Framework, Bank for International Settlements Press & Communications CH-4002 Basel, Switzerland, 2004, 251 p. [Электронный доступ] / Bank for International Settlements Press & Communications. – Режим доступа: <https://www.bis.org/publ/bcbs107.pdf>
20. **Xing L., Amari S.V.** Fault tree analysis. In Handbook of Performability Engineering. Springer, London, 2008, pp. 595-620.

21. **Карасева Е.И., Карасев В.В.** Взаимосвязь диаграмм планирования и диаграммы Карасевой для процессно-событийного управления операционным риском // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем: сборник научных трудов X I I I Всероссийской с международным участием школы-симпозиума АМУР-2019, Симферополь-Судак, 14-27 сентября 2019 / ред. совет: А. В. Сигал (предс.) и др. – Симферополь : ИП Корниенко А. А., 2019. С. 192-196.
22. **T.V. Perneger.** The Swiss cheese model of safety incidents: are there holes in the metaphor?, URL:<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1298298/> (дата обращения 08.09.2025, 12.27).
23. **Sturges H.** The Choice of a Class-Interval // Journal of American Statistical Association. 1926. Vol. 21. P. 65-66.
24. **Jakimowicz A.** The Role of Entropy in the Development of Economics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7516932/>. DOI: 10.3390/e22040452 (Режим доступа 30.08.2023, 19.53).
25. **Bryant, J. Entropy Man** / J. Bryant - VOCAT International Ltd.: Harpenden, UK, 2015, 222 p. ISBN 978-0-9562975-4-9.
26. **Королев, О.Л.** Применение энтропии при моделировании процессов принятия решений в экономике / О.Л. Королев, М.Ю. Кусый, А.В. Сигал - Симферополь : Издательство «ОДЖАКЪ», 2013, 148 стр.
27. **Zhou, R.** Application of Entropy in Finance: A Review [Электронный ресурс] / R. Zhou, R. Cai, G. Tong // Entropy, 15(11):4909-4931, 2013. URL: <https://www.mdpi.com/1099-4300/15/11/4909/pdf>. DOI:10.3390/e15114909 (дата обращения: 22.06.2022).