

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМЫ ИНФОРМИРОВАНИЯ И ОПОВЕЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Предложена методика оценки устойчивости функционирования каналов передачи информации системы информирования и оповещения населения в чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: система информирования и оповещения.

S.V. Razhnikov, S.Yu. Butuzov, V.V. Mitriakov, V.B. Korobko

METHODS OF ASSESSMENT OF FUNCTIONING OF CHANNELS OF INFORMATION TRANSMISSION OF SYSTEM OF INFORMING AND POPULATION NOTIFICATION IN EMERGENCIES

The method of assessment of stability of functioning of information transmission of system of informing and population notification in emergencies is proposed.

Key words: system of informing and notification.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 4 апреля 2017 г.

В условиях современного информационного общества возрастает актуальность надёжного функционирования коммуникаций систем информирования и оповещения населения. Увеличение количества информации приводит к необходимости решению актуальной проблемы, связанной с оценкой надёжности функционирования каналов передачи информации. Особенно актуальной данная задача является в функционировании каналов передачи информации системы информирования и оповещения в ЧС, от надёжной работы которых зависит своевременное оповещение населения.

Анализ научно-технической литературы, находящейся в открытом доступе [1-3], показал, что в настоящее время отсутствуют системные научные исследования устойчивости функционирования информационных каналов передачи информации системы информирования и оповещения в чрезвычайной ситуации (СИОН). Проблема заключается в том, что при возникновении чрезвычайной ситуации может возникнуть конфликт между информационными потоками различных подсистем. Может возникнуть ситуация, при которой первичная информация от высокоскоростных высокопроизводительных источников может быть заблокирована менее производительной линией, что приведёт к тому, что произойдёт полный отказ системы.

Разработчики СИОН для недопущения подобной ситуации вынуждены предусматривать резервные каналы передачи информации, что приводит к увеличению первоначальной стоимости технического проекта.

Целью данной работы является разработка модели оценки устойчивости функционирования информационных каналов СИОН, основанный на изменении величины информационной энтропии системы [4,5]. Это поможет проводить оптимизацию структуры системы, что, в свою очередь, повысит надёжность функционирования системы.

Для разработки методики оценки устойчивости функционирования информационных каналов СИОН, основанной на изменении величины информационной энтропии системы, первоначально необходимо получить характеристическое уравнение системы (1):

$$D(S) = a_0 S^n + a_1 S^{n-1} + \dots + a_{n-1} S + a_n, \quad (1)$$

где n – количество подсистем СИОН;

S – энтропия системы.

Легко показать [6], что необходимым условием устойчивости системы любого порядка является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения (1): $a_0 > 0, a_1 > 0, \dots, a_n > 0$.

Действительно, уравнение (1) можно представить в виде (2) – произведений множителей, содержащих корни $S_1, S_2, \dots, S_n$:

$$a_0(S - S_1)(S - S_2) \dots (S - S_n) = 0. \quad (2)$$

Если все корни характеристического уравнения будут отрицательны, то все множители выражения (2) будут иметь вид (3):

$$a_0(S + |a_1|)(S + |a_2|) \dots (S + |a_n|) = 0, \quad (3)$$

где $|a_i|$ – значение корней.

Произведя умножение в (3), получим (1), в котором все коэффициенты будут определяться положительными членами $|a_i|$ выражения (3), то есть будут положительными.

Для систем, в которых одна или две подсистемы, необходимое условие устойчивости является и достаточным условием. Для систем, в которых три и более подсистем, условие положительности коэффициентов характеристического уравнения является необходимым, но не достаточным условием.

Для того, чтобы оценить, устойчива ли система или нет, необходимо использовать следующий алгоритм, основанный на исследованиях английского математика Э. Рауса [6].

Для оценки устойчивости построим табл. 1.

В первой строке табл. 1 записывают в порядке возрастания индексов коэффициенты характеристического уравнения (1), имеющие чётный индекс: $a_0, a_2, a_4, a_6, \dots$; во второй строке – коэффициенты уравнения (1) с нечётным индексом: $a_1, a_3, a_5, \dots$

В данном случае, число строк табл. 1 равно степени характеристического уравнения (1) плюс единица.

Матрица коэффициентов характеристического уравнения

Коэффициент r_i	Строка	Столбец			
		1	2	3	...
-	1	$a_0 = c_{11}$	$a_2 = c_{21}$	$a_4 = c_{31}$	...
-	2	$a_1 = c_{12}$	$a_3 = c_{22}$	$a_5 = c_{32}$	...
$r_3 = a_0/a_1$	3	$c_{13} = a_2 - r_3 a_3$	$c_{23} = a_4 - r_3 c_{33}$	$c_{33} = a_6 - r_3 a_7$	...
$r_4 = a_1/c_{13}$	4	$c_{14} = a_3 - r_4 c_{23}$	$c_{24} = a_5 - r_4 c_{33}$	$c_{34} = a_7 - r_4 c_{43}$	...
$r_5 = c_{13}/c_{14}$	5	$c_{15} = c_{23} - r_5 c_{23}$	$c_{25} = c_{33} - r_5 c_{33}$	$c_{35} = c_{43} - r_5 c_{43}$	...
...	...	...	...	...	...
$r_i = \frac{c_{1,i-2}}{c_{1,i-1}}$	i	$c_{1,i} = c_{2,i-2} - r_i c_{2,i-1}$	$c_{2,i} = c_{3,i-2} - r_i c_{3,i-1}$	$c_{3,i} = c_{4,i-2} - r_i c_{4,i-1}$	...

Условие устойчивости в данном случае можно сформулировать так: для того, чтобы система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы коэффициенты первого столбца табл. 1 имели один и тот же знак.

Данный процесс может быть легко автоматизирован вследствие простоты его формализации.

Оценить работу системы следует при моделировании информационного воздействия. Предположим, что в СИОН одновременно задействуются несколько информационных каналов.

В этом случае для СИОН, построенной по *дискретному* принципу, величина энтропии определяется по формуле (4) как [7]:

$$S_d = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (4)$$

где p_i – вероятность появления сигнала в i -м канале.

Известно, что в СИОН всегда задействован хотя бы один информационный канал. В этом случае вероятность появления сигнала в данном информационном канале равна единице. Если сигналы в других каналах отсутствуют, то, очевидно, вероятность появления сигналов в них равна нулю. То есть, для заранее известного информационного сообщения выражение (4) будет состоять из слагаемых двух видов: либо $1 \cdot \log_2 1$, либо $0 \cdot \log_2 0$. Слагаемое первого вида равно нулю, а, следовательно, $\lim_{x \rightarrow 0} (x \cdot \log_2 x) = 0$, и, следовательно, энтропия заранее известного сообщения равна нулю.

Следует определить, какое максимальное значение может принимать слагаемое $p_i \cdot \log_2 p_i$.

Для этого продифференцируем уравнение (4) и приравняем производную нулю в виде формулы (5):

$$\frac{d}{dp_i} (-p_i \log_2 p_i) = p_i \log_2 p_i - p_i - p_i \frac{1}{p_i} \log_2 e = 0, \quad (5)$$

то есть
$$p_i = \frac{1}{e}.$$

Так как все слагаемые выражения (4) не превышают значение $\left(\frac{1}{e}\right)\log_2 e$, то из этого следует, что энтропия СИОН есть величина конечная при любом количестве информационных подсистем. Очевидно, при таком распределении вероятностей p_i энтропия принимает максимальное значение, что коррелирует с результатами Э. Рауса.

Теперь воспользуемся методом неопределённых множителей Лагранжа и найдём максимум функции в виде формулы (6), составленной с учётом дополнительного условия: $\sum_{i=1}^n p_i = 1$,

$$F = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i - \lambda \sum_{i=1}^n p_i. \quad (6)$$

Дифференцируя (6) по p_i и приравнявая производную нулю, получаем уравнение (7) или уравнение (8):

$$\frac{dF}{dp_i} = -\log_2 p_i - \left(\frac{1}{p_i}\right)p_i \log_2 e - \lambda = 0, \quad (7)$$

$$-\log_2 p_i = \log_2 e + \lambda. \quad (8)$$

Анализируя выражение (6), можно сделать вывод, что вероятность p_i не зависит от переменной суммирования i , что может быть только в случае, когда все вероятности равны между собой: $p_1 = p_2 = \dots = p_n = p = \frac{1}{n}$.

$$\text{Следовательно, } S_{\text{д}}^{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n.$$

Известно [8-10], что энтропия стремится к своему максимальному значению. Основываясь на этом, можно заключить, что энтропия системы достигает максимального значения, когда вероятности появления информационных сигналов равны.

Следует отметить, что формула (4) верна в ситуации, когда заранее не известно, какое сообщение будет передано в тот или иной момент времени – выбор конкретного сообщения для адресата случаен. Примером использования такой ситуации может быть СИОН, в которой задействуют единый информационный канал. При этом информационные сигналы поступают к адресату независимо.

В случае создания СИОН, в которой ряд сигналов зависит друг от друга, величина информационной энтропии определяется по зависимости, отличной от (4).

Тогда систему сигналов (X, Y) рассматриваем как один сигнал, а множество состояний такого совокупного сигнала представим состоящим из всех пар вида (x_i, y_j) , где $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$. При известных вероятностях $p(x_i, y_j)$ появление пары (x_i, y_j) энтропия системы сигналов (X, Y) определяется выражением (9):

$$S(X, Y) = -\sum_{i=1}^n p(x_i, y_j) \log_2 p(x_i, y_j). \quad (9)$$

Согласно теореме умножения вероятностей имеем формулы (10), (11):

$$p(x_i, y_j) = p(y_j)p(x_i/y_j); \quad (10)$$

$$p(x_i, y_j) = p(x_i)p(y_j/x_i), \quad (11)$$

где $p(x_i)$, $p(y_i)$ – вероятности появления сигналов соответственно $y_j \in Y$, $x_i \in X$;

$p(y_i/x_i)$ – условная вероятность появления сигнала $y_i \in Y$ при условии, что уже имеется сигнал $x_i \in X$;

$p(x_i/y_i)$ – условная вероятность появления элемента $x_i \in X$ при условии, что уже имеется сигнал $y_i \in Y$.

Подставляя в формулу (9) выражения (10), получаем формулу (12):

$$S(X, Y) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p(y_j)p(x_i/y_j) \log_2(p(y_j)p(x_i/y_j)). \quad (12)$$

Учитывая, что $\log_2(p(y_j)p(x_i/y_j)) = \log_2 p(y_j) + \log_2 p(x_i/y_j)$, последнее выражение запишем в виде формулы (13):

$$S(X, Y) = - \sum_{j=1}^n p(y_j) \log_2 p(y_j) \sum_{i=1}^n p(x_i/y_j) - \sum_{j=1}^n p(y_j) \sum_{i=1}^n p(x_i/y_j) \log_2 p(x_i/y_j). \quad (13)$$

Имея в виду, что $\sum_{i=1}^n p(x_i/y_j) = 1$, получаем выражение (14):

$$S(X, Y) = - \sum_{j=1}^n p(y_j) \log_2 p(y_j) - \sum_{j=1}^n p(y_j) \sum_{i=1}^n p(x_i/y_j) \log_2 p(x_i/y_j), \quad (14)$$

В соответствии с (4) первая сумма (14) представляет собой энтропию сигнала Y , вторую сумму второго члена (14) можно рассматривать как энтропию сигнала X при условии, что второй сигнал Y получил конкретное значение y_i . Эту условную энтропию относительно элемента y_i можно назвать частной условной энтропией, которую обозначим как $S(X/y_j)$.

Аналогичное выражение можно получить для $S(Y/x_i)$.

Следует показать, в каких пределах может изменяться энтропия объединения двух информационных сигналов: X и Y . Выражение для условной энтропии будет иметь вид (15):

$$S(X/Y) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p(y_j)p(x_i/y_j) \log_2 p(x_i/y_j), \quad (15)$$

Известно [8], что для независимых случайных событий условные вероятности равны безусловным. Если предположить, что составляющие X и Y сигнала (X , Y) независимы, тогда в выражении (14) возможна замена $p(x_i/y_j) = p(x_i)$, и она может быть преобразована к виду (16):

$$S(X/Y) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \sum_{j=1}^n p(y_j), \quad (16)$$

Учитывая, что $\sum_{j=1}^n p(y_j) = 1$, получим выражение (17):

$$S(X/Y) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) = S(X). \quad (17)$$

То есть, условная энтропия при независимых сигналах равна безусловной энтропии, что приводит к тому, что $S(X, Y) = S(X) + S(Y)$.

Для случая, когда информационные сигналы X и Y полностью зависимы значения энтропий системы будут определяться следующим образом.

Пусть сигнал X принял значение x_i , а сигнал Y – значение y_k . В этом случае условная вероятность $p(y_k/x_i) = 1$, все остальные условные вероятности принимают нулевое значение. Тогда в формулу (15) будут входить слагаемые вида либо $p(x_i) \cdot 1 \cdot \log_2 1$, либо $p(x_i) \cdot 0 \cdot \log_2 0$. В любом случае эти слагаемые равны нулю, поэтому $S(X/Y) = 0$.

Выводы

Представленные результаты по определению энтропий информационных каналов СИОН позволяют количественно определить данные параметры, что, в свою очередь, позволяет оценить устойчивость функционирования СИОН.

Также результат данной работы следует использовать при проектировании информационных каналов СИОН с целью недопущения превышения критического значения энтропии системы.

Литература

1. Сайт научной электронной библиотеки "Киберленинка". <http://cyberleninka.ru>.
2. Синтез и анализ живучести сетевых систем: монография / Громов Ю.Ю., Драчев В.О., Набатов К.А., Иванова О.Г. М.: Машиностроение-1, 2007. 152 с.
3. Грызунов В.В. Оценивание живучести неоднородных структур // Вестник СибГУТИ. 2011. № 1. С. 28-36.
4. Бутузов С.Ю. Энтропийный метод определения эффективности функционирования информационных каналов автоматизированных комплексных систем безопасности промышленных предприятий // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2006. № 1-2 (11-12). С. 62-65.
5. Бутузов С.Ю. Устойчивость функционирования каналов передачи информации автоматизированных комплексных систем безопасности // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2005. № 1-2 (11-12). С. 76-79.
6. Таранцев А.А. Регрессионный анализ и планирование испытаний в задачах принятия решений: монография. СПб.: ИПТР РАН, 2017. 148 с.
7. Куликовский Л.Ф., Мотов В.В. Теоретические основы информационных процессов. М.: Высшая школа, 1987. 383 с.
8. Вилсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем: учеб. пос. Пер. с англ. Дубова Ю.А. М.: "Наука", Главная редакция физико-математической литературы, 1978. 247 с.
9. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и её инженерное приложение: учеб. пос. для вузов // Высшая математика для вузов под ред. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. М.: Высшая школа, 2000. 383 с.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: КНОРУС, 2010. 664 с.

References

1. Sait nauchnoi elektronnoi biblioteki "Kiberleninka" (The site of the scientific electronic library "Kiberleninka"). <http://cyberleninka.ru>.
2. Sintez i analiz zhivuchesti setevykh sistem (Synthesis and analysis of the survivability of network systems): monografiia / Gromov Iu.Iu., Drachev V.O., Nabatov K.A., Ivanova O.G. M.: Mashinostroenie-1, 2007. 152 p.
3. Gryzunov V.V. Otsenivanie zhivuchesti neodnorodnykh struktur (Estimation of survivability of heterogeneous structures) // Vestnik SibGUTI. 2011. № 1. Pp. 28-36.
4. Butuzov S.Iu. Entropiinyi metod opredeleniia effektivnosti funktsionirovaniia informatsionnykh kanalov avtomatizirovannykh kompleksnykh sistem bezopasnosti promyshlennykh predpriatii (Entropy method for determining the efficiency of the functioning of information channels of automated complex security systems for industrial enterprises) // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii. 2006. № 1-2 (11-12). Pp. 62-65.
5. Butuzov S.Iu. Ustoichivost funktsionirovaniia kanalov peredachi informatsii avtomatizirovannykh kompleksnykh sistem bezopasnosti (The stability of the functioning of information transmission channels of automated complex security systems) // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii. 2005. № 1-2 (11-12). Pp. 76-79.
6. Tarantsev A.A. Regressionnyi analiz i planirovanie ispytaniy v zadachakh priniatiia reshenii (Regression analysis and test planning in decision-making tasks): monografiia. SPb.: IPTR RAN, 2017. 148 p.
7. Kulikovskii L.F., Motov V.V. Teoreticheskie osnovy informatsionnykh protsessov (Theoretical basis of information processes). M.: Vysshaia shkola, 1987. 383 p.
8. Vilson A. Dzh. Entropiinye metody modelirovaniia slozhnykh system (Entropy Methods for Modeling Complex Systems): ucheb. pos. Per. s angl. Dubova Iu.A. M.: "Nauka", Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1978. 247 p.
9. Venttsel E.S. Teoriia sluchainykh protsessov i ee inzhenernoe prilozhenie: ucheb. pos. dlia dlia vuzov (Theory of random processes and its engineering application) // Vysshaia matematika dlia vuzov pod red. Venttsel E.S., Ovcharov L.A. M.: Vysshaia shkola, 2000. 383 p.
10. Venttsel E.S. Teoriia veroiatnostei (Probability theory). M.: KNORUS, 2010. 664 p.