

студентов, аспирантов, молодых ученых с международным участием. – Николаев: НУК, 2007. – С.77-82.

4. Тимошенко А. В., Пушкин А. А. Влияние параметров оптимизации системы подчиненного регулирования на демпфирующую способность электропривода // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика". – Випуск №7(128). – Донецьк, 2007. – С.107-112.

In work research of electromechanical interaction of electric and mechanical subsystems is made in structure of two-mass electromechanical system on the basis of computer modelling in a package of applied programs MathCAD and MATLAB Simulink.

Key words: *electromechanical system, damping, elastic connections, mathematical modelling, transients.*

Отримано: 11.04.2008

УДК 001.5:65.011.03

К. Г. Романчук, Д. В. Стефанишин

*Міжнародний економіко-гуманітарний університет
ім. Степана Дем'янука, м. Рівне*

ВИКОРИСТАННЯ БАЙЄСІВСЬКОГО ПІДХОДУ ПРИ УПРАВЛІННІ РИЗИКАМИ АВАРІЙ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

Пропонується метод оцінки та управління ризиками аварій в складних системах з використанням байєсівського перетворення ймовірностей в рамках системної теорії надійності. Метод дозволяє оцінювати повний ризик аварій в складній системі як суму ризиків від відмов окремих підсистем з врахуванням особливостей структурної функції надійності системи, та ідентифікувати події, з якими пов'язуються визначальні ризики як складові повного ризику системних аварій. Поставлена задача оптимізації структури системи й мінімізації сумарного ризику аварій в системі за умов дефіциту ресурсів, що направляються на цілі забезпечення її надійності та безпеки.

Ключові слова: *байєсівський підхід, відмова, невизначеність, ризик аварій, складна система, структурна функція надійності.*

Вступ. Розвиток складних систем відбувається під впливом настільки великої кількості факторів, а допустимі стани системи визначаються настільки значною кількістю параметрів, що всі вони принципово не можуть бути врахованими в рамках класичних динамічних моделей. Кількість таких факторів і параметрів, що мають враховуватися, може бути практично необмеженою.

Що стосується факторів та параметрів, які визначаються в рамках моделей, і які трактуються як такі, що визначають поведінку та надійність системи, то вони, зазвичай, набувають випадкових значень, а інколи є принципово невизначеними.

З метою подолання невизначеності даних щодо факторів та параметрів, які можуть визначати поведінку складних систем, при оцінці надійності використовують імовірнісні моделі та кількісні оцінки ризиків як комбінацій ймовірностей аварійних подій та їх наслідків.

Імовірнісний підхід вважається альтернативою підходу, спрямованого на реалізацію концепції “абсолютної надійності” або ж “абсолютної безпеки”, як такого, що не здатний вирішити проблему аварійності, в тому числі і проблему катастрофічних аварій в складних системах, які, незважаючи на зусилля вчених та інженерів, хоча й рідко, але все ж відбуваються.

Наприклад, для систем, відмови яких пов'язані з катастрофічними соціальними наслідками (атомні електростанції, цивільна авіація тощо) задачі надійності в рамках імовірнісного підходу намагаються вирішувати надтримуючись так званої концепції (або принципу) *практично досяжного мінімального ризику* (as low as reasonably practicable risk principle, ALARP) [1]. Згідно з цим принципом для особливо відповідальних систем з метою забезпечення їх надійності оцінюються ризики, які порівнюються з деякими допустимими величинами, які встановлюють межу терпимості ризику. Ризики вважаються прийнятними в тих випадках, якщо вони є меншими за встановлену межу терпимості, і коли подальше їх зменшення є або практично неможливим (за наявних технологічних й економічних умов), або ціна такого зменшення є непропорційно великою порівняно з отриманим при цьому підвищенням надійності системи.

При оцінці надійності складних систем, в тому разі і з використанням кількісних оцінок ризиків як комбінацій (зазвичай, добутків) ймовірностей аварійних подій та їх наслідків, завжди буде виникати задача ситуативного обмеження розрахункової множини можливих аварійних подій (відмов, несправностей тощо, а також подій, що їх викликають) в системі.

Якщо припустити, що множина ймовірних аварійних подій в системі, які ініціюють різні наслідки, наприклад, збитки, необмежена, то повний (загальний, сукупний) ризик збитків теж може необмежено зростати [1]. Виникає питання – якими аварійними подіями і наслідками, а відповідно і ризиками, в рамках вирішення задачі надійності тієї чи іншої системи, можна знехтувати, а якими ні?

Постановка задачі. В загальному випадку наслідки відмов та аварій в складних системах можуть розрізнятися за характером (економічні, соціальні, екологічні тощо), величиною та за ймовірностями їх виникнення. При цьому, ризики, взяті окремо для різних подій мо-

жуть бути однаковими [2]. Так, з більш рідкісними аварійними подіями (менш ймовірними), зазвичай, пов'язані більш серйозні наслідки, і навпаки – з більш ймовірними – менш масштабні наслідки. Ризики (добутки ймовірностей відповідних подій та їхніх наслідків) при цьому можуть виявитися практично однаковими.

Нехай, для прикладу, в системі мають місце три небажані події зі збитками $D_1 = 10$ млн. гривень при ймовірності $P_1 = 10^{-2}$, рік⁻¹, $D_2 = 50$ млн. гривень при $P_2 = 2 \times 10^{-3}$, рік⁻¹, $D_3 = 100$ млн. гривень при $P_3 = 10^{-3}$, рік⁻¹. В усіх цих випадках розрахункові ризики збитків як добутки $R(D_i) = P_i D_i$ дорівнюють одній і тій же величині 0,1 млн. гривень на рік, тобто питання якою з цих подій можна “безболісно” для надійності системи знехтувати є відкритим.

Сутність запропонованого методу оцінювання повного (узагальненого) ризику аварій в системі, шляхом переоцінки його компонент, що формуються окремими подіями, з використанням байєсівського перетворення ймовірностей, полягає в тому, що по компонентна оцінка повного ризику і його підсумування (узагальнення) проводиться з врахуванням особливостей взаємодії в аспекті надійності системи її структурних одиниць (підсистем, елементів) [3].

Нехай ми маємо скінчену множину можливих аварійних подій $A\{E_{i,A}\}$ в системі S , де кожна з аварійних подій $E_{i,A}$ взята окремо від інших при деяких несприятливих умовах $\theta_k \in \Theta(\theta_k)$, що теж формують скінчену множину, $k = \overline{1, K}$, здатна викликати втрати $L(E_{i,A}, \theta_k)$. Повний (сукупний, узагальнений) ризик аварій в системі $R(A)$ шукатимемо у вигляді суми [4]:

$$R(A) = \sum_{i,k} L(E_{i,A}, \theta_k) \cdot P(E_{i,A}, \theta_k). \quad (1)$$

В (1) ймовірності $P(E_{i,A}, \theta_k)$ – це абсолютні (повні) ймовірності перетину i -х аварійних подій $E_{i,A} \in A\{E_{i,A}\}$, $i = \overline{1, N}$, з умовами $\theta_k \in \Theta(\theta_k)$, $k = \overline{1, K}$, де N – кількість відповідних аварійних подій, що здатні в сполученні з умовами θ_k , $k = \overline{1, K}$, викликати втрати $L(E_{i,A}, \theta_k)$; K – кількість умов θ_k .

Оскільки втрати $L(E_{i,A}, \theta_k)$ мають місце лише у випадку одночасної реалізації аварійної події $E_{i,A}$ та умови θ_k , то ймовірності

$$P(E_{i,A}, \theta_k) = P(E_{i,A})P(\theta_k), \quad i = \overline{1, N}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (2)$$

де $P(E_{i,A})$ – ймовірності настання i -х аварійних подій в системі, $P(\theta_k)$ – ймовірності реалізації умов θ_k .

Таким чином задача оцінки повного (сумарного) ризику аварій в системі $R(A)$ зводиться до оцінки ймовірностей $P(E_{i,A})$, $i = \overline{1, N}$, з врахуванням загальносистемного характеру виникнення кожної з подій $E_{i,A} \in A\{E_{i,A}\}$.

Основні результати. Задамо структурну функцію надійності $\Psi(S)$ системи S і розглянемо скінчену множину подій-відмов $E = \{E_i\}$, $i = \overline{1, N}$, в системі, де події E_i визначатимуть переходи структурних одиниць системи (підсистем, елементів) з працездатних в непрацездатні стани, які, в свою чергу приводять до системної аварії, а саме $\Psi(S): E \rightarrow A$.

Структурну функцію надійності можна встановити шляхом побудови так званих логічних схем надійності [2, 5].

За відомої структурної функції надійності $\Psi(S)$ стає можливою оцінка повної ймовірності відмови системи $P(A)$ як деякої загально-системної аварійної події A за відомих ймовірностей відмов окремих структурних одиниць.

Наприклад, у найпростішому випадку, коли події-відмови E_i , $i = \overline{1, N}$, на рівні підсистем (елементів) можуть вважатися незалежними подіями, для системи, у якій відсутнє резервування, отримаємо оцінку ймовірності системної аварії

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - P(E_i)]; \quad (3)$$

для зарезервованої системи, відповідно,

$$P(A) = \prod_{i=1}^N P(E_i). \quad (4)$$

В (3), (4) через $P(E_i)$ позначені ймовірності відмов структурних одиниць системи.

За відомої повної ймовірності аварії системи ймовірності аварійних подій $E_{i,A}$, $i = \overline{1, N}$, можна оцінити, використавши формулу повної ймовірності:

$$P(E_{i,A}) = P(E_i | A)P(A), \quad (5)$$

де $P(E_i | A)$ – ймовірність події E_i за умови, що відбулася загально-системна аварійна подія A . Це байєсівська ймовірність, яку згідно з теоремою Байєса можна визначити як

$$P(E_i | A) = \frac{P(A | E_i)P(E_i)}{\sum_{i=1}^N P(A | E_i)P(E_i)}, \quad (6)$$

або $P(E_i | A) = \frac{P(A | E_i)P(E_i)}{P(A)}$, якщо відомими є структурна функція

надійності $\Psi(S)$ системи, яка дозволяє працездатність окремих структурних одиниць зв'язати з працездатністю системи, ймовірності подій-відмов E_i , $i = \overline{1, N}$, окремих структурних одиниць, та відповідні їм умовні ймовірності аварії системи $P(A | E_i)$, $i = \overline{1, N}$.

Аварія системи, якщо вона можлива, настає лише тоді, коли відмовляють її структурні одиниці. Менш надійні з них скоріше можуть стати причиною системної аварії, ніж більш надійні. Це означає, що ймовірності $P(A | E_i)$ можна задати у вигляді “ваг” ймовірностей відмов окремих структурних одиниць системи. Нормалізація $P(A | E_i)$ як “ваг” дозволяє сформувати повну групу подій, забезпечивши можливість використання байєсівського підходу. Маємо

$$P(A | E_i) = P(E_i) / \sum_{i=1}^N P(E_i). \quad (7)$$

Використання імовірнісної міри щодо “ваг” (7) можна виправдати тим, що будь-яка нормалізована система ненегативних величин підкоряється аксіомам теорії ймовірностей [6].

Нижче наводиться приклад ілюстративних розрахунків ймовірностей $P(E_{i,A})$ та ризику системної аварії $R(A)$. Дані для розрахунків, наведені в таблиці 1. Втрати $L(E_{i,A})$ прийняті такими, щоб добутки $L(E_{i,A}) \cdot P(E_i)$ були однаковими.

Таблиця 1
Ймовірності виникнення аварійних подій в системі
і очікувані втрати $L(E_{i,A})$, пов'язані з ними

Події	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	A
$P(E_i), P(A)$	0,05	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0675
$L(E_{i,A})$	1	5	10	20	50	86
$L(E_{i,A}) \cdot P(E_i)$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,25

Таблиця 2

Результати розрахунку повного ризику системної аварії
та його складових згідно з даними таблиці 1 ($P(\theta_k) = 1$)

Події	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	A
$P(E_{i,A}), P(A)$	0,0641	0,0026	0,00064	0,00016	0,00003	0,0675
$L(E_{i,A}) \cdot P(E_{i,A})$	0,0641	0,0128	0,00641	0,00320	0,00128	0,0878
“Ваги” $E_{i,A}$, %	72,99	14,6	7,3	3,65	1,46	100

Розрахунки показали, що незважаючи на те, що втрати $L(E_{i,A})$ були прийняті такими, щоб добутки $L(E_{i,A}) \cdot P(E_i)$ були однакови-

ми, ризику $L(E_{i,A}) \cdot P(E_{i,A})$ в результаті дії структурної функції надійності $\Psi(S): E \rightarrow A$ та відповідного перетворення подій E_i в події $E_{i,A}$ виявилися різними. При цьому подія E_1 дає найбільший “внесок” в загальний ризик $R(A)$.

Виключення події E_1 з множини можливих джерел ризику призвело до перебільшення ризику системної аварії (табл. 3), яке склало майже 47%.

Виключення події E_5 з множини можливих джерел ризику не призвело до суттєвого зниження ризику системної аварії (табл. 4).

За даними табл. 2, 4 недоврахування повного ризику склало всього біля 3%. Отже раціональне обмеження множини небезпечних подій, що враховуються при оцінці повного системного ризику, за рахунок відбраковування малоімовірних подій є принципово можливим, хоча при цьому й допускається певне зниження ризику.

Таблиця 3

Результати розрахунку повного ризику системної аварії та його складових при виключенні з розгляду події E_1 ($P(\theta_k) = 1$)

Події	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	A
$P(E_{i,A}), P(A)$	0	0,01391	0,00348	0,00087	0,00014	0,0184
$L(E_{i,A}) \cdot P(E_{i,A})$	0	0,06955	0,03477	0,01739	0,00695	0,12866
“Ваги” $E_{i,A}, \%$	0	54,06	27,02	13,52	5,4	100

Таблиця 4

Результати розрахунку повного ризику системної аварії та його складових при виключенні з розгляду події E_5 ($P(\theta_k) = 1$)

Події	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	A
$P(E_{i,A}), P(A)$	0,06322	0,00253	0,00063	0,00016	0	0,06654
$L(E_{i,A}) \cdot P(E_{i,A})$	0,06322	0,01264	0,00632	0,00316	0	0,08535
“Ваги” $E_{i,A}, \%$	74,08	14,81	7,41	3,7	0	100

Висновки. Таким чином, запропонований метод з використанням байєсівського перетворення ймовірностей дозволяє здійснювати кількісне оцінювання та управління ризиками аварій в складних системах з врахуванням індивідуальних особливостей їх структури та функціонування, відбракувати події, що не є визначальними. “Дефіцит” ризику, тобто величина його недоврахування в співставленні з варіантом розширення множини небезпечних подій, може порівнюватися з додатковими затратами, які слід понести, щоб цей ризик компенсувати. Це дозволить встановити ціну неврахованого ризику й ефективність додаткових затрат на його подолання.

Список використаних джерел:

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989. – 672 с.

2. Векслер А. Б., Ивашинцов Д. А., Стефанишин Д. В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. – СПб.: Изд-во ОАО “ВНИИГ им Б. Е. Веденеева”, 2002. – 589 с.
3. Стефанишин Д. В. Моделювання системних ризиків в рамках байєсівського підходу // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Випуск 2(30). – Рівне: НУВГП, 2005. – С.83-90.
4. Kateryna G. Romanchuk, Dmytro V. Stefanyshyn. A method of estimation of total accident risks at systems // Problems of decision making under uncertainties (PDMU-2008). Abstracts of Int. Conference. – Kyiv-Rivne, Ukraine, May 12-17, 2007. – P.30-32.
5. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Пер. с англ. – М.: Наука, 1984. – 327 с.
6. Райфа Г., Шлейфер Р. Прикладная теория статистических решений / Пер. с англ. А. К. Звонкина и др.; под ред. и с предисловием Ю. Н. Благовещенского. – М.: Статистика, 1977. – 306 с.

A method of assessment and control of accident risks at complicated systems with using of Bayes' transformation of probabilities in the frame of system theory of reliability has been proposed. The method gives possibilities to estimate total accident risk at a complicated system as a sum of failure risks bound of subsystems with taking into account of peculiarities of structural function of reliability of the system and identify productive events in regard to risks as components of total accident risk. A problem of optimization of system structure and minimization of total accident risk at the system in condition of resources deficit intended to support system reliability and safety has been stated.

Key words: *Bayes' approach, failure, uncertainty, accident risk, complicated system, structural function of reliability.*

Отримано: 23.05.2008