

УДК 621.3

Е.В. Брежнев

Национальный аэрокосмический университет им. М.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОЦЕНОК БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ ДОВЕРИЯ

В статье предлагается подход к построению и использованию байесовских сетей доверия для анализа безопасности энергосистем. В качестве оценки безопасности рассматривается критичность, определяемая в терминах вероятности аварии системы и тяжести ее последствий. Оценки критичности представлены в виде значений лингвистической переменной. Оценки безопасности в энергосистеме определяются с помощью байесовской сети доверия, узлами которой являются подсистемы, а связи представлены вектором физического влияния между ними

Ключевые слова: инфраструктура, безопасность, байесовские сети доверия, критичность отказа.

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

Проблема обеспечения надежного и безопасного функционирования энергосистем S_0 является актуальной. Эта актуальность с одной стороны обусловлена высоким ущербом от сбоев и аварий, а с другой неопределенностью и рисками, присущими всему жизненному циклу энергосистем. Энергосистема S_0 может быть представлена в виде совокупности электростанций (S_1), электрических (S_2) и тепловых сетей (S_3), связанных едиными режимами при производстве, преобразовании, передаче и распределении электрической и тепловой энергии при наличии единой системы управления этими режимами.

Проблема анализа взаимовлияния внутри энергосистемы, между энергосистемами и зависимыми от нее инфраструктурами также является актуальной. Подтверждением этому является целый ряд инфраструктурных аварий, произошедших за последнее десятилетие, большая часть которых характеризовалась высоким экономическим ущербом и временем восстановления до некоторого минимально-необходимого уровня, достаточного для обеспечения жизненно-важных потребностей общества. Взаимовлияние является фактором, обуславливающим появление различных видов отказов в системах. Так, например, каскадные отказы в энергосистемах являются примером взаимной обусловленности состояний систем.

На протяжении всего жизненного цикла все подсистемы S_0 находятся под взаимным влиянием друг друга. Под влиянием понимается способность, например, системы S_1 обуславливать состояние системы S_2 . Влияние может быть представлено в виде вектора $\bar{I}(S_1 \rightarrow S_2)$, направленного от системы "объект влияния" к системе "субъект влияния". Для энергосистемы влияние обусловлено обменом энергетическим ресурсом между системами. Вектор влияния

характеризуется не только направлением, но и величиной. Взаимовлияние на различных уровнях S_0 между ее подсистемами является неотъемлемой характеристикой любой энергосистемы. Это взаимовлияние с одной стороны обуславливает устойчивость S_0 к воздействию неблагоприятных внешних

$Z^{int} = \{z_i^{int}\}_I$ и внутренних факторов

$Z^{exter} = \{z_j^{exter}\}_J$, а с другой обуславливает усложнение

ее структуры, приводит к трудностям в прогнозировании состояний и, как следствие, приводит к появлению новых рисков в энергосистемах.

Проблеме анализа инфраструктурного влияния уделяется достаточное внимание, прежде всего в англоязычных публикациях [1 – 4]. Графовые модели получили широкое распространение при анализе взаимовлияний между инфраструктурами. Одним из наиболее используемых моделей являются многоагентные (multiagent systems, MAS) системы. MAS, как система, образована несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами. При построении MAS проводится компьютерное моделирование поведения агентов в зависимости от изменения различных параметров модели [1].

Модели межотраслевого баланса [2] (типа «затраты-выпуск») используются для оценки межотраслевых производственных взаимосвязей между системами в экономике. Эти модели учитывают связи между выпуском продукции в одной отрасли и затратами продукции всех участвующих отраслей, необходимым для обеспечения выпуска этой продукции. Эти модели применяются для анализа инфраструктурных каскадных аварий. Для описания состояний систем используются уровни их неработоспособности.

Искусственные нейронные сети (ИНС) - математические модели, а также их программные или аппаратные реализации, построенные по принципу

организации и функционирования биологических нейронных сетей также активно применяются для анализа надежности взаимосвязей между инфраструктурами [3].

Масштабируемые мультиграфы применяются для моделирования инфраструктур с учетом временной задержки $\Delta T = t_1 - t_2$, между временем начала предоставления сервиса (t_1) и временем его завершения (t_2). Моделируются системы без временной задержки, $\Delta T = 0$, (электричество, телекоммуникации) и временной задержкой $\Delta T > 0$, (водоснабжение, газоснабжение) [4].

Изменение величины и направления влияния между системами может привести к появлению аварий и сбоев в работе энергосистем. В приведенных подходах не учитывается вероятность и тяжесть последствий аварии, как характеристик, являющихся наиболее информативными показателями риска в энергосистемах. Эти показатели могут быть использованы для оценивания критичности энергосистем, как показателя, описывающего ее состояние. Представляет интерес разработка подхода к использованию графовых моделей, в частности байесовских сетей доверия (БСД) для прогнозирования состояний энергосистемы с учетом тяжести последствий аварий и вероятности их возникновения.

Цель статьи – разработка подхода к прогнозированию оценок критичности энергосистем с использованием БСД.

Раздел основного материала

Энергосистема S_0 может быть представлена в виде иерархии подсистем. Верхний уровень представлен системами генерации (АЭС, ГЭС, ТЭС, альтернативные источники), системами передачи и распределения, вспомогательными системами. Нижний уровень представлен техническими подсистемами и компонентами. Так, например, для ГЭС следующий уровень иерархии представлен техническими подсистемами: гидроагрегатами, гидрогенераторами, гидроприводами, трансформаторными станциями и т.д. На этом уровне также находится автоматизированная система управления технологическими процессами станции.

Существует множество типов инфраструктурного влияния [5]. Наиболее значимым типом для энергосистем является физическое влияние $\bar{I}^{phys}(S_1 \rightarrow S_2)$ системы S_1 на систему S_2 , при котором система S_1 передает выработанный энергоресурс системе потребителю S_2 . Любой тип взаимовлияния в системе может быть внутренним и внешним. Внутреннее взаимовлияние для энергосистемы, обусловлено обменом энергоресурсом между ее подсистемами (генерации, распределения, передачи и т.д.), внешнее связано с потоками электроэнергии

с другими зависимыми системами, для обеспечения всех потребителей электроэнергии (объектов промышленности и других видов инфраструктур).

Критичность как показатель безопасности энергосистемы. В соответствии с [6], критичность $Crt(S_i)$ системы измеряется в пространстве вероятности P возникновения аварии (сбоя) в этой системе и тяжести S ее последствий. В рамках данного подхода критичность $Crt(S_0)$ предлагается рассматривать в качестве оценки безопасности энергосистемы S_0 .

Оценки критичности могут быть представлены в различных шкалах. Применяются качественные и количественные шкалы. В рамках данного подхода предлагается рассматривать лингвистические оценки критичности энергосистемы.

В рамках подхода предлагается рассматривать критичность в виде лингвистической переменной с терминами {High (H), Medium (M), Low (L)}. Пример семантической интерпретации лингвистических термов критичности S_i , описывающих ее состояния, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Семантическая интерпретация лингвистических термов критичности системы S_i

Лингвистическая переменная, описывающая критичность системы	Семантическая интерпретация лингвистической переменной
High	Потеря работоспособности S_i . Полная потеря динамики производственных процессов для S_i .
Medium	Снижение динамики производственных процессов для S_i , увеличение производственного цикла. Поэтапная деградация системы, снижение эффективности всех процессов.
Low	Полное отсутствие изменений в производственных процессах и состояниях для S_i .

Существуют различные подходы к определению критичности состояний системы.

Детерминистский подход предполагает полную определенность в оценках тяжести и вероятности. Однако предположение о полной определенности в оценках показателей критичности существенно упрощает подход и снижает степень доверия к результатам.

Представляет интерес представление критичности состояний систем с различными степенями доверия. Существуют два основных способа определения вероятности наступления случайного события: объективный (статистический) и субъективный (прогнозный).

Объективная оценка вероятности выводится по данным статистической обработки результатов наблюдений за повторяющимися процессами, порождающими случайные события. Однако данный подход абсолютно не применим при отсутствии необходимой статистики.

Кроме того, множество событий, происходящих в энергосистемах, например, отказы по общей причине, являются редкими событиями.

В этом случае уместнее говорить об использовании субъективных оценок вероятности, основанных на знаниях, уверенности эксперта.

Прогнозирование оценок безопасности энергосистемы состоит в определении прогнозной оценки ее критичности в любой момент времени с учетом физического взаимовлияния систем различного уровня иерархии.

БСД как основа для прогнозирования оценок критичности в энергосистеме. Любая энергосистема может быть представлена в виде графа, где узлами являются ее системы, а ребра описывают существующий тип взаимовлияния между ними. БСД [7] представляют собой графовые модели вероятностных и причинно-следственных отношений между переменными в статистическом информационном моделировании.

Фрагмент БСД, описывающий энергосистему S_0 , представлен на рис. 1.

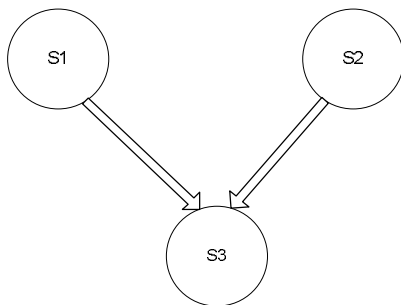


Рис. 1. Фрагмент БСД, описывающий систему S_0

БСД, используемая для определения прогнозных оценок критичности энергосистемы, представляет собой направленный ациклический граф, в котором:

- каждый узел представляет собой некоторое событие, описываемое случайной величиной (СВ), которая может иметь несколько состояний. В рамках данного подхода, в качестве СВ рассматривается $Crt(S_0)$ лингвистическая оценка критичности системы, описываемая терм множеством {High, Medium, Low};

- все узлы (“субъекты влияния”), связанные с родительскими узлами (“объекты влияния”), определяются таблицей условных вероятностей (ТУВ);

- дуги описывают физическое взаимовлияние $\bar{T}^{phys}(S_1 \rightarrow S_2)$ между узлами S_i и S_j ;

- для узлов без родителей вероятности ее состояний являются безусловными (маргинальными).

Таким образом, БСД используется для:

- прогнозирования критичности системы (“субъекта влияния”), в зависимости от состояний систем родителей (“объектов влияния”). При этом, в зависимости от поступивших в БСД свидетельств об изменениях состояния узлов родителей, с использованием ТУВ, определяющих связь состояний рассматриваемого узла с узлами родителями (вероятность пребывания узла в одном из множества состояний критичности в зависимости от состояний узлов родителей) осуществляется пересчет вероятности нахождения узла в каждом из своих возможных состояний.

- определения состояний узлов-родителей по свидетельствам (фактам) о возможном состоянии зависимого узла (задача диагностики).

Для фрагмента, представленного на рисунке 1, рассмотрим три гипотезы, определяющие состояние системы S_3 :

- H_1 – предположение о том, критичность системы в момент времени $t + \Delta t$ является High;
- H_2 - предположение о том, критичность системы в момент времени $t + \Delta t$ является Medium;
- H_3 - предположение о том, критичность системы в момент времени $t + \Delta t$ является Low.

Априорные вероятности $P^{apr}(S_3^{(k)})$ пребывания системы в каждом из приведенных выше состояний могут определяться на основе субъективной уверенности эксперта, полученной на основе анализа показателей, описывающих систему.

Множество состояний системы S_3 задается множеством вида:

$$\Omega_{S_3} = \{S_3^{(1)} = Crt(S_3) = H, S_3^{(2)} = Crt(S_3) = M, S_3^{(3)} = Crt(S_3) = L\},$$

где $S_3^{(k)}$ – k-е состояние системы S_3 .

Аналогично могут быть заданы состояния Ω_{S_1} (Ω_{S_2}) систем S_1 (S_2).

В БСД, вероятности пребывания системы S_3 в различных состояниях из множества Ω_{S_3} в зависимости от состояний вершин родителей могут быть определены по соотношению вида:

$$P(S_3^{(k)}) = \sum_i \sum_j P(S_3^{(k)} / S_1^{(i)}, S_2^{(j)}) * P(S_1^{(i)}) * P(S_2^{(j)}), \quad (1)$$

где $P(S_3^{(k)})$ - вероятность нахождения системы S_3 в k-м состоянии;

$P(S_3^{(k)} / S_1^{(i)}, S_2^{(j)})$ – условная вероятность нахождения системы S_3 в k-м состоянии при условии

находження системи S_1 в i – м состоянии и системы S_2 в j – м состоянии;

$P(S_1^{(i)})$ – вероятность нахождения системы S_1 в i -м состоянии;

$P(S_2^{(j)})$ – вероятность нахождения системы S_2 в j -м состоянии.

Таким образом, исходные вероятности $P_{\text{арг}}(S_3^{(k)})$ обновляются на апостериорные вероятности $P(S_3^{(k)})$ при появлении в БСД новых фактов, подтверждающих изменение критичности систем S_1 и S_2 .

Таким образом, по соотношению (1) определяются вероятности пребывания системы S_3 в состояниях, описываемых выражениями: “критичность – High” ($P(\text{Crt}(S_1) = \text{High})$), “критичность – Medium” ($P(\text{Crt}(S_1) = \text{Medium})$) и “критичность – Low” ($P(\text{Crt}(S_1) = \text{Low})$).

Прогнозная оценка критичности системы S_i может быть определена как:

$$\text{Crt}(S_i) = \arg \max(P(\text{Crt}(S_i) = \text{High}), P(\text{Crt}(S_i) = \text{Medium}), P(\text{Crt}(S_i) = \text{Low})).$$

Выводы

Таким образом, энергосистема может быть представлена в виде БСД, с узлами - подсистемами и связями, обусловленными физическим влиянием между ними. Влияние представлено в виде вектора, характеризующегося направлением и величиной. Состояние каждого узла описано лингвистической переменной. Использование БСД позволяет прогно-

зировать лингвистические оценки критичности в энергосистемах, определяя апостериорные вероятности состояний узлов. Подход может быть полезен при оценивании безопасности энергосистем в условиях неопределенности с учетом различных типов взаимовлияния узлов в энергосистемах.

Список литературы

1. Dudenhofer, D.D., Permann M.R. & Manic, M. 2006. CIMS: A framework for infrastructure interdependency modelling and analysis. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*.
2. Setola, R., De Porcellinis, S. & Sforza, M. 2009. Critical infrastructure dependency assessment using the input-output inoperability model. *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 2. – P. 170-178.
3. Min, X. & Duenas-Osorio, L. 2009. Inverse Reliability-based Design of Interdependent Lifeline Systems. *TCL 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*.
4. Svendsen, N.K. & Wolthusen, S.D. 2007. Connectivity models of interdependency in mixed-type critical infrastructure networks. *Information Security Technical Report*, 12. – P. 44-55.
5. Pederson, P., Dudenhofer, D., Hartley, S. & Permann, M. 2006. Critical Infrastructure Interdependency modeling: A survey of U.S and international research. Report prepared by the Idaho National Laboratory.
6. Stamatis D. *FMECA from theory to execution*. Milwaukee, Wisconsin: ASQC Quality Press; 1995.
7. Bensi, M.T., Der Kiureghian, A. & Straub, D. 2009. A Bayesian Network Framework for Post-earthquake Infrastructure System Performance Assessment. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*.

Поступила в редколлегию 10.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ПРОГНОЗУВАННЯ ЛІНГВІСТИЧНИХ ОЦІНОК БЕЗПЕКИ ЕНЕРГОСИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ БАЙЕСОВСЬКИХ МЕРЕЖ ДОВІРИ

С.В. Брежнев

В статті запропоновано підхід до побудови та використання байесовських мереж довіри для аналізу безпеки енергосистем. В якості оцінки безпеки системи розглядається її критичність. Оцінки критичності представлені в вигляді значень лінгвістичної змінної. Енергосистема розглядається у вигляді байесовської мережі довіри, вузлами якої є її підсистеми, а зв'язки представлені вектором фізичного впливу між ними.

Ключові слова: енергосистема, безпека, байесовська мережа довіри, критичність

BAYESIAN BELIEF NETWORK – BASED PROGNOSIS OF POWER GRID SAFETY VALUES

E.V. Bregznev

The approach to formation and application of Bayesian Belief Network for power grid safety assessment is suggested in the paper. The criticality is treated as system safety value. Criticalities values are represented as linguistic values. Power grid is represented as Bayesian Belief Network, with nodes as power grid subsystems and links represented as physical influence vectors

Keywords: power grid, safety, Bayesian Belief Network, system criticality