

УДК 519.1-621.311.1+658.26

УЧЕТ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ КРИТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ИНФРАСТРУКТУРНЫХ СИСТЕМАХ

Г.Г. Гребенюк

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: gggrebenuk@gmail.com

А.А. Роцин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: rochinaa@ipu.ru

Л.А. Серeda

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: sereda@ipu.ru

Ключевые слова: уязвимость, устойчивость инфраструктурных систем, минимальные сечения

Аннотация: Рассматривается понятие критического элемента применительно к устойчивости инфраструктурных систем. Анализируются методы поиска критических для снабжения целевых потребителей элементов. Описывается разработанный подход для определения порядка восстановления поврежденных критических элементов, с учетом синергетических последствий их отказа. Данный подход позволяет снизить потери производительности системы в процессе ее восстановления.

1. Введение

Инфраструктурные системы играют ключевую роль в жизни современного общества. Почти каждый элемент такой системы может стать уязвимым при воздействии на него неблагоприятных факторов. Эти факторы могут вызвать его отказ или повреждение, вследствие чего элемент частично или полностью теряет свою функциональность.

Не каждый уязвимый элемент является критическим для системы. Как правило, под критическими понимаются элементы, отказы которых приводят к наибольшим потерям производительности системы [1].

Задачи поиска уязвимостей и критических элементов (объектов) представляют интерес при проектировании инженерной инфраструктуры, при выработке мер противодействия неблагоприятным воздействиям (далее НВ) на элементы сетей.

Свойство уязвимости можно интерпретировать как степень восприимчивости системы к определенным возмущениям, которые могут привести к снижению ее функций [2]. Это свойство может проявиться при наличии у системы некоторых

технических характеристик, которые могут сделать ее подверженной НВ, как правило, неучтенным при проектировании.

Среди НВ можно выделить естественные (землетрясения, наводнения, старение и т.д.) и умышленные, в результате которых появляется множество поврежденных объектов.

В последние годы анализу уязвимостей уделяется пристальное внимание [1]. Ранее упор в оценке степени восприимчивости системы к тем или иным отказам и повреждениям ее элементов делался в рамках управления рисками, расчета надежности системы при известных вероятностях отказов ее элементов и ущербе от этих отказов. Термин «уязвимость» ориентирован на события низкой интенсивности, для которых оценка с точки зрения риска представляется слишком ограниченной ввиду неопределенности возникающих при этом отказов и связанных с ними последствий.

Если сетевая инфраструктура характеризуется производительностью или эффективностью, то уязвимость можно измерить как их относительную потерю для определенного набора поврежденных в результате НВ элементов.

Интегральным свойством инфраструктурной системы, проявляющимся при НВ, является устойчивость [3]. Она включает надежность как способность системы и ее элементов выполнять требуемые функции в течение определенного времени в установленных условиях [4], уязвимость и ряд других свойств, включая способность к восстановлению системы с заданной скоростью (или временем восстановления).

Именно, надежность и способность к восстановлению определяют поведение инфраструктуры при чрезвычайных событиях, потерю ее эффективности или производительности. Из выше приведенного определения критического элемента следует, что чем критичнее элемент, тем сильнее последствия от его повреждения для системы, включая потери производительности. Однако, если затраты и сроки восстановления производительности системы являются приемлемыми, то такие отказавшие или поврежденные элементы могут не считаться критическими. Аналогично, в [5] критичность элементов связана с надежностью системы и восстановлением.

Ввиду того, что задаче устойчивости инфраструктурных систем, поврежденных в результате естественных процессов, посвящены многочисленные работы, например [6, 7], далее рассматриваются умышленные НВ, приводящие к нарушению снабжения потребителей ресурсами, и модели поиска элементов, критических в этом виде НВ.

2. Модели поиска критических элементов

При поиске критических элементов широко применяются топологические и аналитические методы анализа. В топологическом анализе система представляется в виде графа. Отказы элементов моделируются удалением узлов или ребер из графа. Удаляемые элементы выбираются на основе их важности для сохранения структуры сетевой системы, как правило методом перебора, включая использование метода Монте-Карло. При переборе выбирается такая стратегия выбора удаляемых узлов сети, при которой минимальное множество удаляемых узлов обеспечивает изоляцию от сети максимального множества оставшихся узлов.

Для оценки важности используются такие характеристики графа, как степень вершины, промежуточность, диаметр, средняя длина пути, коэффициент кластеризации и др. Указанные характеристики используются в приближенных методах анализа с целью изолировать от сети максимальное множество ее узлов.

Основной функцией инфраструктурных сетей является обеспечение потребителей энергией и ресурсами, среди которых имеются потребители разной степени важности (категории). В этом случае наибольшие негативные последствия от умышленных НВ возникают при повреждении тех элементов сети, к которым присоединены объекты потребления, важные для экономики страны, региона, поселения. Как правило, важных потребителей называют целевыми объектами (далее ЦО).

Обеспечение безопасности важных объектов потребления и элементов сети, снабжающих их ресурсами, требует вложения определенных инвестиций. При выборе направлений инвестиций важно, чтобы критические для безопасности элементы находились точными методами.

Приоритетная стратегия выбора критических элементов (КЭ) инфраструктурной сети в рассматриваемой задаче должна включать анализ их достижимости из источников энергии и ресурсов и анализ достижимости ЦО из КЭ.

К точным методам решения данной задачи можно отнести аналитические методы расчета потоков и методы изоляции важных объектов потребления, основанные на структуре графа.

К аналитическим методам относятся применение нелинейных уравнений потока мощности переменного тока и линеаризованных уравнений потока мощности постоянного тока. Решение нелинейных уравнений большой размерности характеризуется большой вычислительной сложностью. Этому недостатка лишена модель постоянного тока, которая часто используется в задачах экономического диспетчирования, решаемых методом линейного программирования. Оба метода требуют знания точных характеристик сети, режимов ее работы. Этому недостатка лишены методы, использующие структуру графа сети.

Ниже дано краткое описание методов изоляции важных объектов потребления, основанных на анализе структуры графа, а, именно, методов построения сечений, блокирующих ЦО, на основе полного перебора и с использованием минимального покрывающего множества.

Определим сечение как минимальное множество вершин графа, представляющего инфраструктуру обеспечения целевых объектов энергией и ресурсами, при удалении которых нарушается достижимость вершин, соответствующих целевым объектам, из вершин, соответствующих источникам ресурсов. Вершины сечений соответствуют критическим элементам сети.

2.1. Метод построения сечений на основе полного перебора

Для поиска всех минимальных сечений в однородной сети необходимо перебрать все сочетания вершин графа, определяя для каждого сочетания, существует ли хотя бы один путь от любого источника до любого ЦО. Если такого пути не существует, исследуемое сочетание вершин является сечением, но не обязательно минимальным. Перебор всех сочетаний вершин – это NP-полная задача, что требует для сетей большого размера значительного объема вычислений. При поиске минимальных сечений предлагается использовать методы оптимизации перебора [8], позволяющие пропускать избыточные наборы вершин.

Принципиальным отличием построения сечений в гетерогенной сети является тот факт, что возможность функционирования объекта может иметь сложную зависимость от доступности используемых этим объектом ресурсов. Для учета этого с каждой вершиной графа связана логическая функция, описывающая функционирование соответствующего объекта в зависимости от наличия у него различных ресурсов. Такие функции удобнее всего задавать в форме конъюнктивной нормальной формы (КНФ).

В такой модели поиск критических объектов при помощи перебора вершин устроен так же, как в однородной сети, и методы оптимизации перебора аналогичны. Для расчета последствий удаления набора вершин используется упомянутая выше логическая функция.

2.2. Метод построения сечений с использованием минимального покрывающего множества

Для поиска минимальных сечений используются методы, применяемые для диагностирования сложных технических систем [9, 10], включая построение минимального гиперграфа инфраструктуры. Применительно к ЦО, гиперграф содержит множество путей между ЦО и источниками. Каждый путь определяется как гиперребро, являясь одновременно конфликтным множеством.

Гиперребро называется минимальным, если не имеется другого гиперребра, поглощающего его. Гиперграф является минимальным, если каждое гиперребро минимально. Минимальные гиперребра образуют минимальные конфликтные множества гиперграфа. Минимальные гиперребра можно представить в виде булевой матрицы со столбцами, представленными гиперребрами и строками, соответствующими вершинам графа.

Расчет минимальных сечений на основе минимальных конфликтных множеств тесно связан с задачей о покрытии множествами. Минимальное сечение определяется как минимальное покрывающее множество набора конфликтных множеств.

На основе булевой матрицы строится функция покрытия, которая для матрицы с k столбцами задается конъюнкцией вида D_0, \dots, D_k , где D_i – дизъюнкция всех переменных, приписанных строкам с единицей в столбце. Затем строится КНФ функции покрытия.

Перемножив скобки в КНФ и выполнив поглощения, получим минимальные сечения – дизъюнктивные нормальные формы [11].

Для нахождения минимальных сечений, кроме рассмотренного подхода, связанного с перемножением скобок в КНФ, который часто называют алгоритмом Петрика, можно воспользоваться методом совпадающих множеств, основанном на построении HS-дерева [10].

3. Синергетика в выборе стратегии восстановления

В данном разделе рассматривается способность инфраструктуры к восстановлению, которая, как сказано выше, вместе с надежностью определяют поведение инфраструктуры при НВ.

Здесь рассмотрим подход к решению задачи восстановления элементов, входящих в состав минимальных сечений. Такие элементы могут быть критическими из-за изоляции ЦО от источников ресурса. Однако, при их восстановлении с приемлемой потерей производительности ЦО, эти элементы перестают быть критическими. Таким образом, важна стратегия восстановления на основе свойств самой системы.

Предлагается подход к восстановлению, учитывающий как собственные последствия отказов отдельных элементов, так и последствия, связанные с возникновением синергетического эффекта.

Определим полный отказ системы, как отказ всех n элементов минимального сечения, и частичный отказ, как множество всех возможных отказов кратности $1, 2, \dots, n - 1$ этого сечения.

Рассмотрим сетевую систему, которая содержит множество узлов – источников R , целевых объектов P (потребителей) и узлов передачи и преобразования ресурса T (подстанции, линии электропередач и др.) и определим в системе множество отказов F .

Под последствиями $C(F)$ отказа F будем понимать потерю производительности узлов из множества P , которые утратили связь с узлами из множества R .

Если отказ F имеет кратность больше 1, то он может сопровождаться синергетическим эффектом. В [12] дан общий подход к оценке синергетических последствий. Для этого множество F разбивается на подмножества всеми возможными способами, например, i -ое разбиение будет выглядеть следующим образом $F = S_1^i, S_2^i, \dots, S_m^i$, при этом $S_1^i \cap S_2^i \cap \dots \cap S_m^i = \emptyset$, где m -количество подмножеств в i -ом разбиении, и оценка синергетических последствий отказа для i -го разбиения рассчитывается по формуле:

$$(1) \quad C_{syn}(F) = C(F) - \max_i (\sum_{j=1}^m (C(S_j^i))),$$

где $C(S_j^i)$ – собственные последствия от подмножества S_j^i (j -го подмножества i -го разбиения множества F).

В отличие от [12], оценку синергетических последствий для задачи восстановления предлагается выполнять для каждого частичного отказа кратностью больше 1. Потерю производительности будем оценивать количеством отключенных потребителей из множества P .

Для учета синергетического эффекта выделим все частичные отказы F' и вычислим для каждого из них $C_{syn}(F')$, используя формулу (1). Для этого аналогичным образом необходимо разбить на подмножества каждый частичный отказ F' всеми различными способами. Например, w -ое разбиение частичного отказа, состоит из g подмножеств и имеет вид $F' = S_1^w, S_2^w, \dots, S_g^w, S_1^w \cap S_2^w \cap \dots \cap S_g^w = \emptyset$.

Для выбора объектов для восстановления составим таблицу, каждая строка которой соответствует либо отдельному элементу (отказу кратности 1), либо частичному отказу кратностью больше 1. Упорядочим строки таблицы по убыванию последствий (для отдельного k -го элементов будем брать собственные последствия $C(T_k)$, для частичных отказов F' – синергетические последствия $C_{syn}(F')$). Далее на каждом шаге выбирается верхняя строка таблицы (с наибольшими последствиями). В случае, если строке соответствует частичный отказ, выбираем такой элемент, собственные последствия которого наибольшие. После выбора очередного элемента из таблицы исключаются все строки, содержащие данный элемент, и процедура выбора повторяется. Процедура прекращается, если число выбранных элементов достигла ограничения по условию задачи, либо в таблице не осталось строк.

В результате указанных действий выбирается порядок восстановления, при котором первыми будут восстановлены те элементы, в том числе входящие состав комбинаций с высокими синергетическими последствиями, отказы которых привели к наибольшим потерям производительности системы.

4. Заключение

Проведен анализ точных методов поиска блокирующих объектов – минимальных сечений, умышленное повреждение которых приводит к изоляции значимых потребителей. Информация о критических объектах важна для определения направлений инвестиций на повышение безопасности инфраструктурных систем.

Разработан подход, позволяющий определить порядок восстановления критических элементов, который основан на выделении частичных отказов и оценке их последствий, в том числе, синергетических.

Предложенный подход позволяет снизить потери производительности целевых объектов в процессе восстановления инфраструктурной системы.

Список литературы

1. Abedi A., Gaudard L., Romerio F. Power flow-based approaches to assess vulnerability, reliability, and contingency of the power systems: The benefits and limitations // *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 201. P. 106961.
2. Deng Y., Song L., Zhou Zh., Liu P. Complexity and Vulnerability Analysis of Critical Infrastructures: A Methodological Approach // *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Vol. 2017 (2). P. 1-12.
3. Гребенюк Г.Г., Лубков Н.В. Надежный подход к анализу устойчивости инженерной инфраструктуры // *Управление большими системами*. 2022. Вып. 99. С. 157-181.
4. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2021. 40 с.
5. Aydin N.Y., Duzgun H.S., Heinimann H.R., Wenzel F., Gnyawali K.R. Framework for improving the resilience and recovery of transportation networks under geohazard risks // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2018. Vol. 31. P. 832-843.
6. Reid R. How to make infrastructure more resilient against climate change, American society of civil engineers. <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues-обращения-/magazine-issue/article/2022/01/how-to-make-infrastructure-more-resilient-against-climate-change> (дата 07.12.2023).
7. Sathurshan M., Saja A., Thamboo J., Haraguchi M., Navaratnam S. Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review of Measurement Frameworks // *Infrastructures*. 2022. Vol. 7 (67). P. 1-26.
8. Kuprijanov B.V., Roschin A.A. Limiting the Search in Brute Force Method for Subsets Detection // *Proceedings of the 14th International Conference Optimization and Applications (OPTIMA-2023, Petrovac, Montenegro)*. Petrovac, Montenegro: Springer, 2023. P. 329-343.
9. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. С.Пб.: Изд-во С.Пб. гос. ун-та, 2007. 276 с.
10. Haenni R. Generating Diagnoses from Conflict Sets. https://www.researchgate.net/publication/2338224_Generating_Diagnoses_from_Conflict_Sets (дата обращения: 23.12.2023).
11. Grebenuk G.G., Nikishov S.M. Blocking of Energy and Resource Supply of Target Objects in Network Infrastructures // *Automation and Remote Control*. 2018. Vol. 79 (3). P. 535-544.
12. Jönsson H., Johansson J., Johansson H. Identifying critical components in technical infrastructure networks // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2008. Vol. 222, Is. 2. P. 235-243.