

А. А. ШТЫРКИНА

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В докладе рассматривается задача обеспечения безопасности киберфизических систем на основе анализа структурных свойств графа, моделирующей систему. Структура графа может оцениваться с помощью его спектра. В докладе представлено исследование вида спектров различных сетевых топологий, которые используются при построении современных киберфизических систем.

Введение. Обеспечение безопасности киберфизических систем (КФС) является актуальной задачей в силу их повсеместного внедрения в критические области деятельности человека. Задача обеспечения безопасности КФС является нетривиальной, а существующие методы не носят универсальный характер. Для ее решения предлагается моделировать КФС с помощью графа и строить системы безопасности, основываясь на математическом аппарате спектральной теории графов, с учетом структурных свойства исследуемой системы. Для разработки такого подхода необходимо понимание структурных свойств существующих КФС. В докладе представлено исследование свойств КФС с точки зрения структуры моделирующего их графа.

Структурные свойства графов киберфизических систем. Киберфизические системы являются неотъемлемой основой для разработки инновационных решений в различных сферах деятельности человека, начиная от области здравоохранения и заканчивая автоматизацией сложных технологических процессов в критической инфраструктуре. Обеспечение безопасности таких систем осложняется рядом факторов, среди которых можно выделить отсутствие единой стандартизации, что связано с большим числом используемых устройств и протоколов взаимодействия, высокой сложностью организации КФС и большим объемом данных, циркулирующих в системе. Перечисленные проблемы диктуют создание универсального подхода, который будет учитывать инвариантные относительно области применения характеристики КФС.

КФС характеризуется наличием физических и информационных компонентов, взаимодействие которых позволяет оптимизировать процессы управления и принятия решений. Ключевой особенностью КФС является нетривиальная структура, которая усложняется вместе с ростом количества и качества решаемых задач. Тогда процесс функционирования КФС, учитывающий ее структурные особенности, может быть смоделирован с использованием теории графов [1]. Атакующие воздействия на систему отражаются на моделирующем графе: они могут выражаться как в изменении количества компонентов и связей, так и в изменении их характеристик. Таким образом, безопасность КФС сводится к анализу структурных свойств моделирующего графа.

Одним из направлений теории графов, которое исследует структурные свойства, является спектральная теория графов. Спектр графа представляет собой собственные значения матрицы, задающей граф (матрица связности, матрица Лапласа). Для графов, обладающих похожей структурой, распределение значения спектров также похоже. Такая особенность позволяет использовать спектр графа как инвариант для задачи сравнения графов. Спектр также отражает структурные свойства. Например, второе наименьшее собственное значение матрицы Лапласа показывает алгебраическую связность графа.

Для разработки подхода к обеспечению безопасности КФС был выполнен обзор структурных особенностей графов, моделирующих современные КФС.

Классификация КФС. Большое разнообразие реализаций киберфизических систем приводит к сложности их единой классификации. Известны различные критерии классификации таких систем.

Одним из критериев классификации КФС является область применения [2]: коммуникации, энергетика, строительство, здравоохранение, производство, военная сфера, робототехника, транспортная инфраструктура. Классификация по такому критерию может включать в себя меньшее число потенциальных типов КФС [3]: сферы, связанные с человеком (здравоохране-

ние, коммуникации); сферы, связанные автономными процессами (робототехника (MANET), производство); сферы, связанные с окружающей инфраструктурой (умный город, умные сети энергоснабжения).

С точки зрения структуры КФС, важным критерием является сложность выполняемых операций: чем нетривиальнее выполняемые задачи, тем большие требования накладываются на число устройств и качество их взаимодействия.

Сложность решаемых КФС задач может определяться видом используемых данных и методами их обработки [4]:

- на уровне соединения: система использует данные из разнородных источников;
- на уровне преобразования: система использует данные после их предварительной обработки и агрегации;
- на кибернетическом уровне: система использует данные от других КФС для обогащения собственной базы знаний;
- на когнитивном уровне: система использует проанализированные с помощью интеллектуальных методов данные для отслеживания собственного состояния;
- на уровне конфигурации: система способна выполнять переконфигурацию и адаптироваться к деструктивным воздействиям.

Сетевые топологии КФС

Любая КФС представляет собой интеграцию физических и информационных процессов, которая реализуется с помощью телекоммуникационного оборудования. К построению таких систем применимы топологии из теории сетей [5]:

1. Топология «звезда» (рис. 1) представляет собой множество прямых соединений, объединенных одним концентратором. Такая топология используется для Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth. Спектр топологии «звезда» характеризуется высокой частотой нулевого собственного значения матриц смежности и Лапласа.

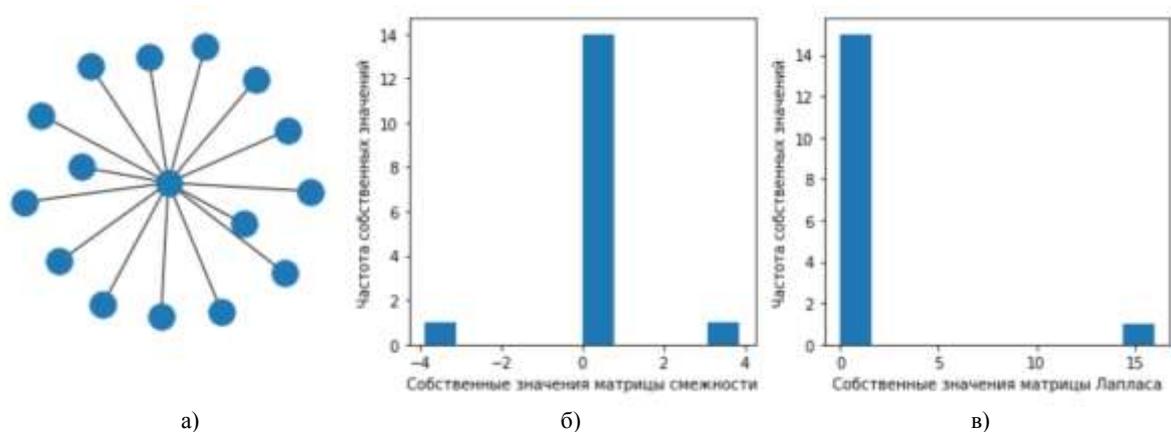


Рис. 1 а) изображение топологии «звезда», б) спектр матрицы смежности, в) спектр матрицы Лапласа

2. Топология «кольцо» (рис. 2) может использоваться для последовательной передачи данных в изолированном сегменте КФС. Спектр при небольшой размерности графа характеризуется относительно равномерной частотой собственных значений. Однако с увеличением числа вершин (начиная от 20) наибольшие по абсолютной величине собственные значения начинают обладать наибольшей частотой.

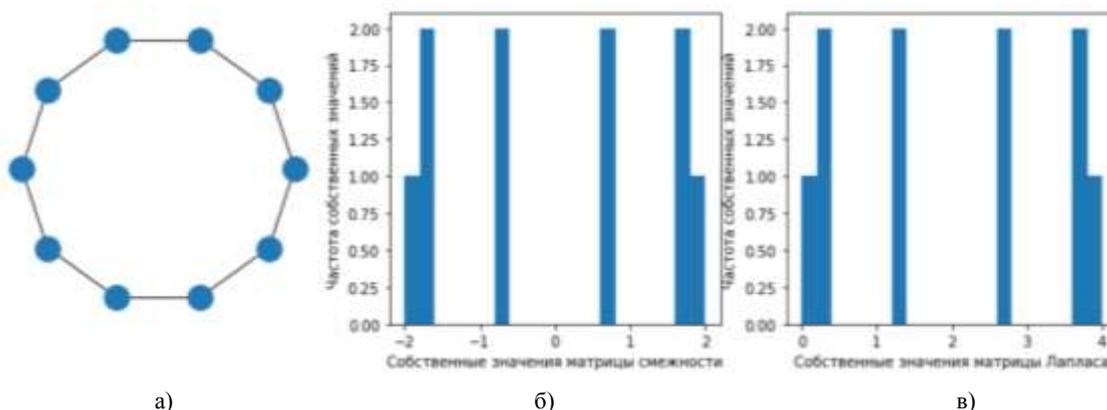


Рис. 2 а) изображение топологии «кольцо», б) спектр матрицы смежности, в) спектр матрицы Лапласа

3. Топология «шина» (рис. 3) используется для передачи информации от равноправных агентов информационного обмена по мультиплексному каналу передачи данных. Такой тип распространен для датчиков низкоскоростной промышленной автоматизации (RS-485). Для отображения топологии «шина» использовался полносвязный граф, показывающий связь между всеми участниками сети.

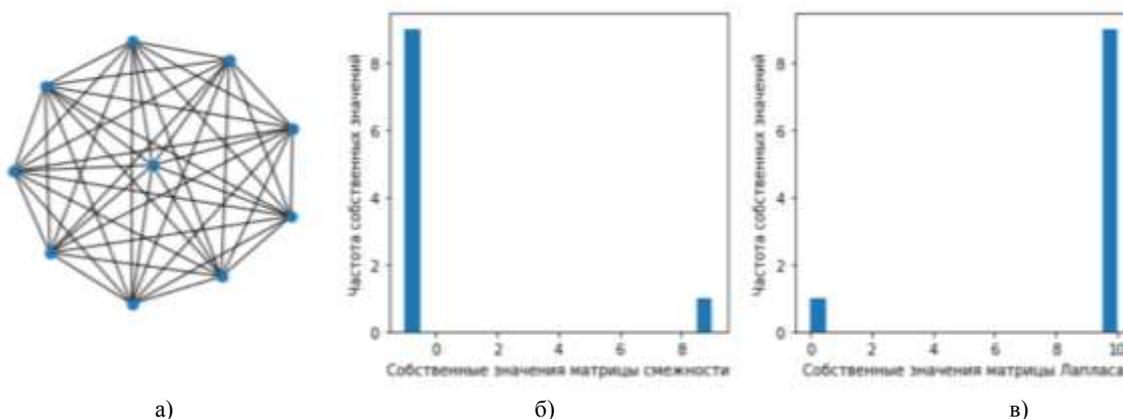


Рис. 3 а) изображение топологии «шина», б) спектр матрицы смежности, в) спектр матрицы Лапласа

4. Гибридная сеть представляет собой объединение сетей различных топологий. На рис. 4 изображена гибридная сеть, состоящая из топологий «звезда» и «кольцо». Как видно, результирующий спектр имеет лишь отдаленные общие черты со спектрами составляющих топологий. Однако изменение числа вершин в использованных топологиях влияет на величину наиболее часто собственного значения.

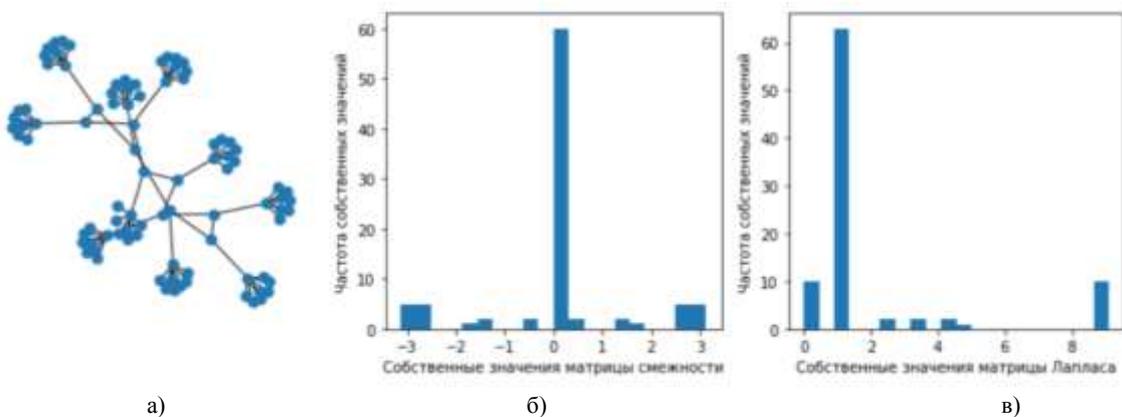


Рис. 4 а) изображение гибридной топологии, б) спектр матрицы смежности, в) спектр матрицы Лапласа

5. Ячеистая топология (рис. 5) является одной из самых многообещающих топологий для организации КФС. В такой топологии устройства равноправно могут взаимодействовать друг с другом. Как правило, такой тип сетей используется для беспроводных передатчиков (ZigBee, 6LoWPAN, LoRa-mesh). Сети ячеистой топологии в ряде работ моделируются с помощью графов со свойством «малого мира» [6]. Спектр таких графов не описывается аналитической функцией и в зависимости от числа вершин может иметь одно или два пиковых значений частоты.

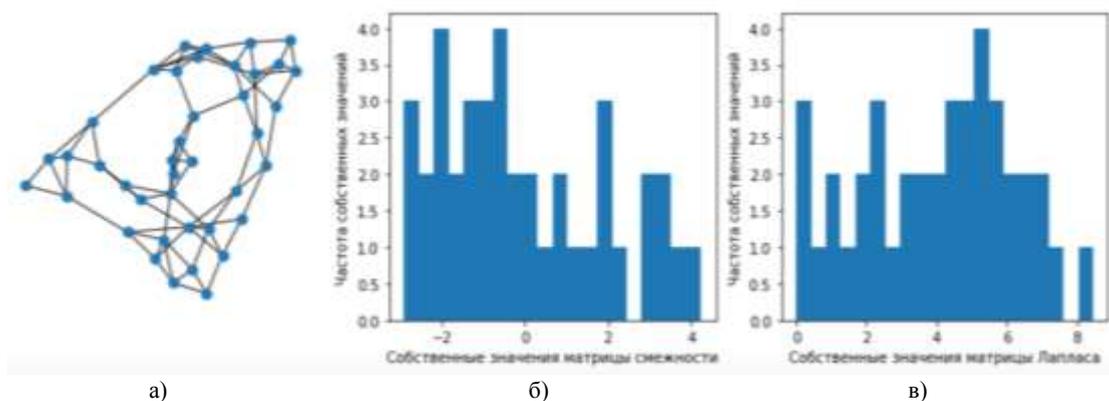


Рис. 5 а) изображение ячеистой топологии, б) спектр матрицы смежности, в) спектр матрицы Лапласа

С увеличением сложности решаемых КФС задач усложняется и топология сети: для сбора информации с датчиков достаточно топологии «звезда» или «шина», для решения более нетривиальных задач сеть системы усложняется за счет добавления дополнительных сенсоров, агрегаторов и модулей аналитики данных.

Примеры сложных реальных КФС:

1. Граф сетей энергоснабжения западных штатов США [7]. Сети энергоснабжения, в том числе «умные», обладают нетривиальной топологией. В ряде исследований было показано, что сети таких систем моделируются с помощью графов со свойством «малого мира». На рис. 6а представлено характерное для таких графов распределение спектра.

Графы с таким свойством характеризуются небольшой длиной кратчайшего пути и высоким коэффициентом кластеризации.

Алгебраическая связность графа равна 0,00075. Такое низкое значения для графа со свойством «малого мира» объясняется большим числом вершин графа и сравнительно небольшой средней степенью.

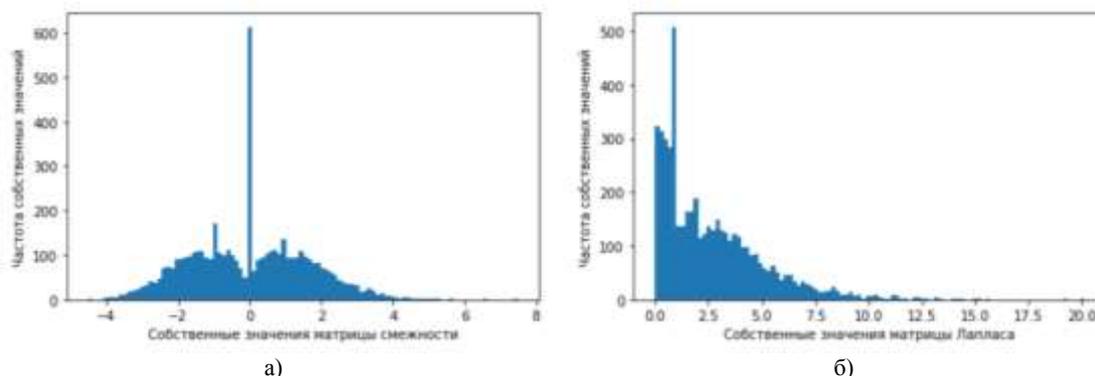


Рис. 6 а) спектр матрицы смежности, б) спектр матрицы Лапласа

2. Граф системы Интернета Вещей, представляющей собой датчики температуры, подключённые к плате Intel ATLAS EDGE и Beagle (BeagleBone Blue), которые обмениваются данными по протоколу Bluetooth (рис. 7) [8]. Спектр матрицы смежности моделирующего графа является симметричным относительно нуля с «хвостом» справа, что напоминает спектр случайного графа.

Алгебраическая связность полученного графа равна 121,2312. Такое высокое значение связности говорит о том, что число вершин и принцип их соединения делает граф высокосвязным, а значит более отказоустойчивым при выведении из строя компонентов сети.

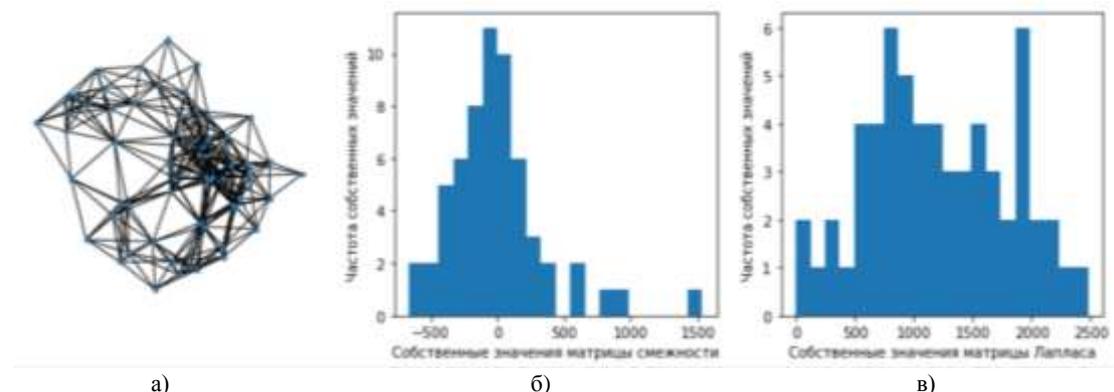


Рис. 7 а) графы системы Интернета Вещей, б) спектр матрицы смежности, в) спектр матрицы Лапласа

Заключение. В приведенном докладе проведено исследование спектральных свойств графов, моделирующих КФС. Киберфизические системы классифицированы в соответствии с областью применения, а также со сложностью выполняемых функций. Необходимость выполнять нетривиальные задачи провоцирует усложнение структуры системы, а значит и ее сетевой топологии. Показано распределение спектров графов, задающих как простые, так и сложные реальные КФС. Для сети энергоснабжения спектр показал близость к графу со свойством «малого мира», для системы Интернета Вещей распределение спектра оказалось близким к распределению спектра случайного графа.

Работа проводилась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90109.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Штыркина А.А.** Обеспечение устойчивости киберфизических систем на основе теории графов. *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2021. №2. С. 145-150.
2. **Rajkumar R. et al.** Cyber-physical systems: the next computing revolution. *Design automation conference*. IEEE, 2010. Pp. 731-736.
3. **Dong G. et al.** Graph Neural Networks in IoT: A Survey //arXiv preprint arXiv:2203.15935. 2022.
4. **Cardin O.** Classification of cyber-physical systems developments: Proposition of an analysis framework //International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Springer, Cham, 2016. Pp. 25-33.
5. **Shukalov A.V., Zharinov I.O., Zharinov O.O.** Network communication and identification of the cyber-physical systems. 2021.
6. **Verma C.K. et al.** A realistic small-world model for wireless mesh networks. *IEEE Communications Letters*. 2011. Vol. 15. No. 4. Pp. 455-457.
7. **Watts D.J., Strogatz S.H.** Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*. 1998. V. 393. No. 6684. Pp. 440-442.
8. **Guo X. et al.** Deep multi-attributed graph translation with node-edge co-evolution. *2019 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*. IEEE, 2019. Pp. 250-259.

A.A.Shtyrkina (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg)

Research of structural properties of cyber-physical systems

The report considers the problem of ensuring the security of cyber-physical systems based on the analysis of the graph structural properties. The structure of the graph can be estimated using the spectrum. The report presents a study of the type of spectra of various network topologies that are used in the construction of modern cyber-physical systems.

Авторы готовы представить текст на английском языке для сборника материалов мультиконференции, который будет подан для индексирования в Scopus