

УСТОЙЧИВОСТЬ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ИНФРАСТРУКТУР

Гребенюк Г.Г., Калянов Г.Н., Середа Л.А.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
gggrebenuk@gmail.com, kalyanov@ipu.ru, lsereda123@gmail.com

Аннотация. Предлагается комплексный подход к повышению устойчивости инженерных распределительных инфраструктур при неблагоприятных воздействиях. Данный подход включает исследование организационной и инженерной устойчивости, анализ влияния ошибок в потоках данных оперативно диспетчерской службы на функционирование инженерной инфраструктуры и ее производительность. Рассматриваются модели поиска уязвимостей и их влияние на бесперебойность обеспечения услугами потребителей.

Ключевые слова: управление устойчивостью, неблагоприятное воздействие, бизнес-процесс, инженерная инфраструктура.

Введение

Жизнеобеспечение населения и деятельность промышленных предприятий зависит от функционирования инженерных распределительных инфраструктур, которые предоставляют им услуги по электро-, водо-, газоснабжению и др. Важной частью этих инфраструктур являются распределенные сети передачи и распределения ресурсов. Непосредственное управление такими инфраструктурами осуществляется диспетчерскими службами, которые входят в состав организационной структуры предприятий, эксплуатирующих эти сети.

Особенностью инженерных сетей является расположение их многочисленных компонент на значительных территориях и связанная с этим подверженность различным неблагоприятным воздействиям (НВ) [1]. Эти НВ можно разделить на внутренние и внешние воздействия. К внутренним НВ относятся техногенные аварии, к внешним – природные явления, такие как землетрясения, наводнения, ураганы и прочее, а также преднамеренные воздействия, такие как кибератаки, диверсии и т.д.

Для уменьшения негативных последствий предприятия предпринимают различные действия с целью повысить устойчивость организации к НВ. Эти действия относятся как к адаптации бизнес-процессов к условиям НВ, в частности, функции оперативно-диспетчерских служб, так и к повышению надежности и защиты технических компонентов собственно инженерных инфраструктур.

Исследованию устойчивости инженерных инфраструктур, в частности, распределительных, посвящено значительное количество публикаций [2-6]. В [2] обосновывается важность применения надежного подхода в задаче повышения устойчивости инфраструктурных систем. В [3; 4] рассматривается влияние на устойчивость стратегии восстановления поврежденной инфраструктуры с учетом ремонтных ресурсов, ограничений по времени и стоимости. В [5; 6] рассматриваются показатели, позволяющие выполнить оценку устойчивости инженерных инфраструктур на основе изменения функции производительности.

В описанном в [2] подходе большое внимание уделяется анализу надежности технических компонентов в рамках управления рисками. При анализе устойчивости предъявляются более слабые требования к надежности технических компонентов, чем при управлении рисками, в приоритет отдается увеличению скорости восстановления, выявлению уязвимостей для вероятных угроз, выбор для них стратегий восстановления. Анализ устойчивости позволяет проводить исследование больших по масштабу систем при разнообразии потенциальных угроз и, как правило, не требует расчета рисков. Каждому виду угроз соответствует характерный набор уязвимостей. Поиск таких уязвимостей является отдельной важной задачей повышения устойчивости сложных инженерных систем.

При анализе устойчивости инженерных распределительных инфраструктур предлагается рассматривать инженерную и организационную компоненты. В [7] приводится определение инженерной устойчивости, как способности системы противостоять серьезному сбою в пределах приемлемых параметров деградации и восстанавливаться в течение приемлемого времени и с приемлемыми затратами. Широко распространенной мерой оценки инженерной устойчивости является характер изменения функции производительности после и во время негативных воздействий по сравнению с ее докризисным значением. Для количественной оценки инженерной устойчивости системы используется анализ изменения ее функции производительности после НВ.

Организационная устойчивость напрямую зависит от бизнес-процессов предприятия, в частности, его оперативно-диспетчерской службы. К ним относится контроль состояния, техническое обслуживание и ремонт, управление режимами работы сети и др. Организационная устойчивость

определяется, как способность организации противостоять сбоям и неожиданным событиям благодаря стратегической осведомленности и связанному оперативному управлению внутренними и внешними потрясениями [8].

Ошибки в БП оперативно-диспетчерской службы, возникающие по внутренним (например, из-за их неполноты) или внешним (например, при кибератаках) причинам опосредованно (через технические компоненты) также значительно влияют на производительность [9].

В настоящее время БП, как правило, не ориентированы на управление аварийными процессами, выходящими за рамки условий, оговоренных в нормативной документации, и часто выполняются в ручном режиме, исходя из целесообразности действий в текущей ситуации. Исключением являются мероприятия, проводимые МЧС и отраженные в документах, посвященных гражданской обороне, например, в [10].

В статье рассматриваются комплексный подход к повышению устойчивости инженерных распределительных инфраструктур, вопросы взаимодействия ее организационной и технической компонент, предложения по расширению бизнес-процессов в условиях негативных воздействий.

1. Анализ взаимодействия организационной и технической компонент инфраструктурных систем в рамках оперативно-диспетчерского управления

Как указано выше, организационная и инженерные компоненты инфраструктурных систем в условиях НВ рассматриваются отдельно без учета их взаимного влияния. Однако, влияние этих компонентов друг на друга может иметь существенное значение.

Взаимодействие этих компонент в виде модели, состоящей из двух слоев, изображено на рис. 1. Верхний слой отображает БП, описывающие деятельность оперативно-диспетчерской службы. Каждая бизнес-функция изображена на этом слое окружностью, потоки данных между бизнес-функциями обозначены пунктирными стрелками. На нижнем слое представлена инженерная распределительная инфраструктура, где закрашенными окружностями обозначены объекты преобразования ресурсов (электрические подстанции, водонапорные станции, компенсаторы и т.д.), а сплошными линиями – связи (проводные или трубопроводные линии распределения) между указанными объектами. Стрелки между слоями обозначают обмен информацией: данные о параметрах и техническом состоянии с датчиков технических компонентов инфраструктуры поступает на верхний слой, эти данные используются бизнес-функциями оперативно-диспетчерского управления, которые формируют управляющие команды для нижнего слоя.

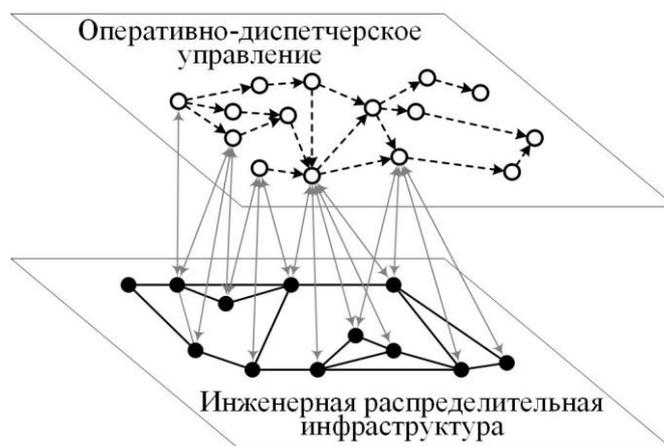


Рис. 1. Модель, описывающая взаимодействие бизнес-процессов оперативно-диспетчерской службы и технических компонентов сети

К функциям оперативно-диспетчерской службы относятся:

- управление режимами сети;
- руководство оперативными переключениями в нормальных и аварийных режимах;
- мониторинг и контроль эксплуатации технологического оборудования;
- сбор, обработка и обмен информацией о технологических нарушениях (авариях), чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера;
- управление и контроль выполнения ремонтно-восстановительных работ и др.

Как видно из представленных функций оперативно-диспетчерская служба участвует в управлении аварийными процессами. При больших объемах повреждений, в том числе при НВ, она привлекается к управлению аварийно-восстановительными работами совместно с МЧС и другими сторонними аварийными службами.

Устойчивость инженерной распределительной инфраструктуры рассматривается на стадиях функционирования в условиях НВ. Эти стадии отражают состояние инфраструктуры до, при и после действия негативных воздействий, и характеризуются свойственными им изменениями производительности (рис. 2).

При возникновении НВ (в момент времени t_0 на рис. 2) на стадии поглощения (t_0, t_1) наблюдается деградация, при этом потеря производительности инфраструктуры частично компенсируется различными факторами, обеспечивающими ее надежность, например, резервированием.

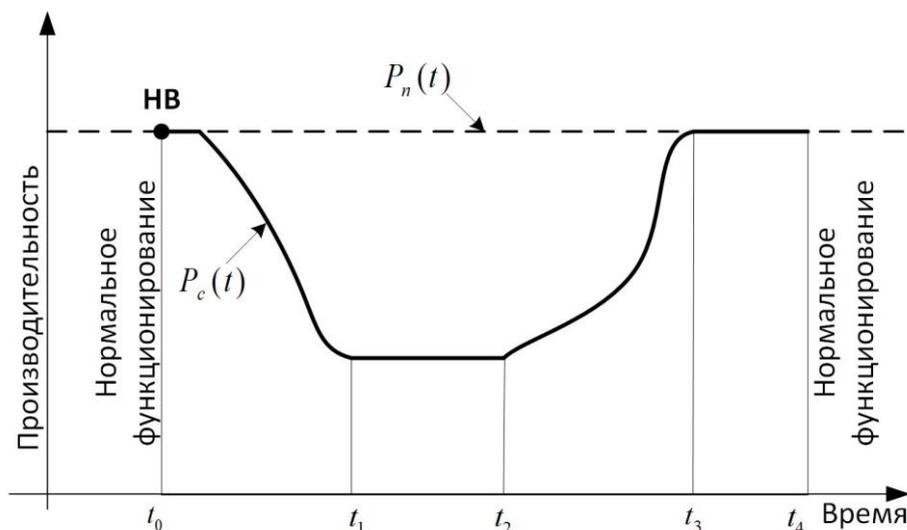


Рис. 2. График изменения производительности

Процесс деградации заканчивается, и наступает стадия оценки последствий (t_1, t_2), в ходе которой, помимо анализа масштабов повреждений оборудования, проводятся мероприятия по обеспечению безопасности выполнения восстановительных работ.

На стадии восстановления (t_2, t_3) обеспечивается рост производительности до допустимого уровня. Для этого, исходя из доступных временных, материальных, людских и других ресурсов, производится моделирование различных вариантов стратегии восстановления, включающих в себя план-графики проведения восстановительных работ. Выбор наилучшей стратегии с учетом описанных выше ограничений осуществляется по заданным критериям, одним из которых является минимизация потери производительности на указанном интервале времени. Ремонт и замена поврежденного оборудования производится в соответствии с выбранной стратегии.

Стадия адаптации (t_3, t_4) характеризуется переходом инфраструктуры из аварийного в нормальный режим функционирования. Когда основные работы по восстановлению поврежденного оборудования закончены, то осуществляется разработка, планирование и выполнение мероприятий по предотвращению и увеличению скорости ликвидации последствий будущих инцидентов (с учетом информации об авариях, полученной ранее). Эти мероприятия могут включать поиск и устранение уязвимостей в технических компонентах инфраструктуры (например, осуществляется резервирование, обновление и т.д.), то есть повышается инженерная устойчивость при будущих НВ. Вместе с тем проводится анализ деятельности персонала и аварийных бригад, выполняется поиск и устранение уязвимостей в бизнес-процессах оперативно-диспетчерской службы, и, таким образом, повышается организационная устойчивость.

Последовательность типовых этапов повышения устойчивости инженерной инфраструктуры при реализации угроз и уязвимостей показана на рис. 3.

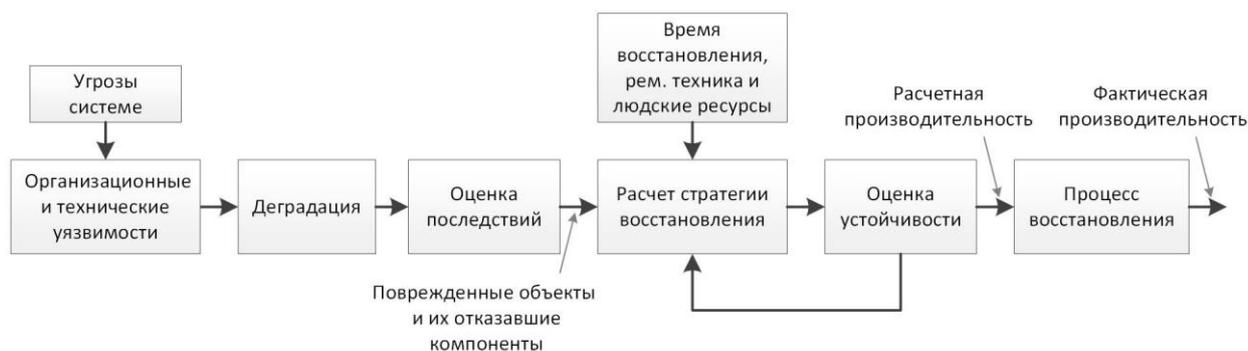


Рис. 3. Последовательность событий и типовых этапов повышения устойчивости инженерной инфраструктуры

2. Влияние ошибок бизнес-процессов и уязвимостей на устойчивость

При негативных воздействиях в БП могут возникать ошибки, влияющие на восстановление. В частности, ошибки, связанные с разрушением/повреждением объектов, в результате которого некоторые бизнес-функции диспетчерского управления не могут быть выполнены. Здесь в зависимости от масштаба воздействий для незначительных повреждений могут быть применены две группы методов, а именно, анализ потоков данных БП [11] и/или поиск альтернативных путей доставки ресурса по графу сети [12]. Для серьезных разрушений необходимо восстановление БП.

Например, в случае повреждения не только инженерной инфраструктуры, но и офисного здания, некоторые функции просто не смогут быть выполнены из-за отсутствия рабочего места (такая ситуация может быть отнесена к ошибкам в потоках данных [13]), поэтому необходимо обеспечить резервирование рабочих мест. К распространенным видам ошибок относятся ошибки в потоке данных о наличии ремонтных бригад, техники и требуемых материальных ресурсов на складе. Так при увеличении интенсивности отказов электрического оборудования, например, трансформаторов, проводных линий и др. в условиях НВ снижаются запасы этого оборудования на складах. Такая ситуация может возникнуть в результате ошибки в бизнес-процессе закупок (отсутствие его реакции на повышение интенсивности отказов при НВ). Невозможность замены важного оборудования вызывает снижение объемов поставляемых услуг потребителям (производительности системы).

Для адаптации предприятия к возможным угрозам оперативно-диспетчерская служба должна обладать знаниями о уязвимостях в технической компоненте инфраструктурной системы.

Уязвимости и связанные с ними отказы определяются для вероятных угроз. Так, при угрозе преднамеренного воздействия для поиска уязвимостей могут применяться топологические или аналитические модели. В первом виде моделей используется граф сети и алгоритмы поиска, основанные на характеристиках графа таких, как степень вершины, центральность, диаметр графа и др. Во втором виде моделей используется аналитическое описание процессов потокораспределения, содержащее реальные характеристики сети (сопротивление, длины участков, ограничения пропускной способности и др.).

Поиск уязвимостей для таких угроз, как стихийные бедствия типа ураганов, землетрясений, наводнений и др. проводится в зоне, подверженной их воздействию. Эти уязвимости зависят от многих факторов, таких как направление и сила ветра, стойкость конструкций и др., большая часть которых связана с географическим положением предприятия и может определяться на основе статистики природных явлений.

3. Изменения бизнес-процессов для повышения устойчивости инженерных инфраструктур

В условиях негативных воздействий для повышения устойчивости инженерных инфраструктур возникает необходимость в создании новых и/или модификации существующих процессов. Так один из основных процессов – оперативно-диспетчерского управления – может быть расширен следующими функциями:

- подготовка к изменению режимов работы технических устройств, используемых для снижения допустимых мощностей и нагрузок во время и после негативных воздействий;
- аварийные отключения, локализация отказов;
- реконфигурация и т.д.

Также в условиях НВ возникает необходимость в модификации вспомогательных процессов, а именно, добавление и/или расширение следующих БП путем включения в них новых функций, например, таких как:

- управление техническим обслуживанием и ремонтом, определяющее состояние работоспособности технических устройств до негативных воздействий (за счет дополнительной функциональности повышения надежности уязвимых компонент с целью предотвращения опасных последствий);
- определение и оценка критических уязвимостей в организационной и инженерной компонентах;
- прогнозирование возникновения негативных воздействий, их интенсивности и территориального распределения;
- формирование сценариев реакции БП на угрозы со стороны негативных воздействий, моделирование и верификация этих сценариев;
- планирование мероприятий по ликвидации последствий негативных воздействий и др.

Помимо модификации и/или включения новых функций во вспомогательные процессы также необходима реорганизация обеспечивающих процессов. К таким процессам относятся:

- обеспечение ресурсами, включая состав и резерв ресурсов на складе;
- обучение персонала, аварийных бригад и привлекаемых сил способам действий при возникновении негативных воздействий, к реагированию и восстановлению системы;
- разработка нормативно-методического обеспечения деятельности при возникновении и ликвидации последствий негативных воздействий;
- документирование извлеченного опыта, полученного в результате управления конкретным инцидентом или кризисом и др.

Например, процесс обучения персонала предприятия мерам противодействия негативным воздействиям, ликвидации последствий аварий и восстановления нарушенного производства содержит такие же функции, как и аналогичные образовательные процессы: подготовка расписаний, организация лекций и семинаров, контроль приобретенных знаний и т.п. При этом на входе этого БП должны появиться новые образовательные программы, преподаватели требуемой специализации и т.д.

С другой стороны, процесс обеспечения ресурсами (например, трубами нужной маркировки) в сценарии, связанном с негативными воздействиями, должен предусматривать обеспечение поставки их в большем объеме, в том числе новыми поставщиками, а также сокращение времени ремонта (например, за счет привлечения дополнительных бригад).

Для верификации новых функций и сценариев могут быть применены методы тестирования, а также статического и динамического анализа БП, описанные в [13].

Разработка новых и расширение функциональности существующих БП способствует сохранению непрерывности бизнес-услуг в условиях негативных воздействий.

4. Модели формирования стратегии восстановления

Существует несколько подходов к формированию стратегии восстановления инженерной инфраструктуры, которая должна определять состав, порядок и сроки ремонта поврежденных и отказавших сетевых элементов (узлов и линий) - выявленных уязвимостей в согласовании с располагаемыми финансовыми, материальными (механизмы) и людскими (ремонтные бригады) ресурсами. Сформированная стратегия должна быть наилучшей в смысле используемого критерия. Чаще всего таковым является стоимость работ, тогда остальные располагаемые ресурсы и время восстановления выступают как ограничения.

К настоящему времени определены различные стратегии восстановления. Так в [3] определяются приоритетные для восстановления поврежденные компоненты и предлагается многокритериальная модель оптимизации показателя устойчивости и времени восстановления, в которой используется смешанно-целочисленное программирование. В [4] с использованием решетчатой структуры рассмотрены три широко применяемые стратегии: восстановление от периферии (PR), восстановление на основе веса узла (PRNW) и локализованное восстановление (LR). Вес узла, как правило, связывается со значимостью подключенных к нему потребителей (больницы, заводы, школы и др.), которых этот узел обеспечивает ресурсом.

Согласно стратегии PR, восстановление начинается с выбора изолированного узла с наибольшим весом, соседнего с функциональным узлом, то есть с узлом, получающим ресурс, и ремонта связывающей их линии. Так как соседних функциональных узлов в решетке может быть больше одного, то выбор линий для восстановления происходит случайным образом. После того, как все изолированные узлы одного веса оказались подключенными, на следующем шаге выбирается другой

изолированный узел с наибольшим весом, соседний с функциональным узлом сети и выполняется ремонт связывающей их линии и т.д. В стратегии PRNW преимущество в восстановлении отдается линиям, которые связывают в первую очередь изолированный узел с наибольшим весом с функциональным узлом сети, и связям этого узла с другими значимыми узлами. Выбор линий (для восстановления) с соседним функциональным узлом также происходит случайным образом. В стратегии LR восстановление начинается с выбора корневого узла и восстановления его связей. Связи остальных узлов восстанавливаются в порядке удаления этих узлов от корневого узла, независимо от их веса. В этих стратегиях используется постепенное пошаговое восстановление линий от присоединенных на предыдущем шаге, ранее изолированных узлов, к узлам, присоединяемым линиями, восстановленными на текущем шаге.

Для выбора наилучшей стратегии необходимо сформулировать показатель количественной оценки устойчивости. За последние годы разработано несколько показателей устойчивости, например, описанных в [5, 6], с учетом таких аспектов, как надежность, восстанавливаемость, адаптивность и др. В данной работе используется нормированная интегральная метрика устойчивости [6], согласно которой показатель устойчивости Φ для графика на рис. 2 вычисляется следующим образом:

$$\Phi = \int_{t_0}^{t_4} P_c(t) dt / \int_{t_0}^{t_4} P_n(t) dt, \quad (1)$$

где $P_c(t)$ – реальная (текущая) производительность сети на интервале времени t_0-t_4 , $P_n(t)$ – производительность при нормальном функционировании сети.

Показатель рассчитывается для каждого варианта стратегии, и из них выбирается тот, для которого значение показателя наибольшее. Если это значение не соответствует желаемому, то необходимо изменить ограничения на ресурсы (число ремонтных бригад, технических средств, финансов и др.).

5. Заключение

В работе устойчивость инженерных распределительных инфраструктур рассматривается как комбинация инженерной и организационной составляющих. На примере бизнес-процессов оперативно диспетчерской службы выполнен анализ взаимодействия указанных составляющих.

Рассмотрены уязвимости технических компонент инфраструктуры и бизнес-функций оперативно диспетчерской службы. Выполнен анализ ошибок в потоках данных, рассмотрены методы поиска уязвимостей, предложен подход к разработке сценариев восстановления и оценке влияния негативных воздействий на устойчивость, сформулированы предложения по адаптации бизнес-процессов с целью сохранения непрерывности бизнес-услуг в условиях негативных воздействий.

На основе предложенных моделей и методов должны формироваться рекомендации по повышению мер противодействия неблагоприятным факторам.

Литература

1. Grebenuk G.G., Lubkov N.V. Methodological Aspects of Territorially Dispersed Clusters Functionality Analysis // Proceedings of the 12th International Conference Management of large-scale system development (MLSD). Moscow: IEEE. – 2019. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8910989>. doi: 10.1109/MLSD.2019.8910989.
2. Гребенюк Г.Г., Лубков Н.В. Надежный подход к анализу устойчивости инженерной инфраструктуры // Управление большими системами. 2022. Вып. 99. - С. 157-181.
3. Almoghathawi Y., González A.D., Barker K Exploring Recovery Strategies for Optimal Interdependent Infrastructure Network Resilience // Networks and Spatial Economics. 2021. – Vol. 21. – P. 229–260.
4. Afrin T., Yodo N. Resilience-Based Recovery Assessments of Networked Infrastructure Systems under Localized Attacks // Infrastructures. – 2019. Vol. 4, Issue 1, P. 11-28.
5. Panteli M., Mancarella P., Trakas D. N., Kyriakides E., Hatzigiorgiou N. D. Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems // IEEE Transactions on Power Systems. – 2017. – Vol. 32, No. 6. – P. 4732-4742.
6. Ouyang M., Dueñas-Osorio L., Min X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems // Struct. Saf. – 2012. – Vol. 36-37. – P. 23–31.
7. Nan Cen, Sansavini Giovanni A quantitative method for assessing the resilience of infrastructure systems // Reliability Engineering & System Safety. – 2017. – Vol. 157. – P. 35-53.
8. Alessandro Annarelli, Fabio Nonino Strategic and operational management of organizational resilience: Current state of research and future directions // Omega. – 2016. – Vol. 62. – P. 1-18.
9. Mo Y., Chabukswar R., Sinopoli B. Detecting integrity attacks on SCADA systems // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2014. – Vol. 22(4). – P. 1396-1407.
10. СП 165.1325800.2014. Свод правил. Инженерно-технические мероприятия по гражданской обороне. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/3847> (дата обращения 10.04.2024).

11. *Grebenyuk G.G., Kalyanov G.N., Kovalyov S.P., Lukinova O.V., Roschin A.A., Sereda L.A.* The Impact of Errors in Business Processes on the Operability of Engineering Infrastructure // Proceedings of the 16th International Conference Management of large-scale system development (MLSD). Moscow: IEEE. – 2023. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10303790>.
12. *Калянов Г.Н.* Теория бизнес-процессов. – М.: Горячая линия –Телеком, 2023. – 296 с.
13. *Богачева Д.Н., Гребенюк Г.Г., Калянов Г.Н., Ковалёв С.П., Лукинова О.В., Роцин А.А., Серeda Л.А.* Влияние ошибок бизнес-процессов на работоспособность инженерной инфраструктуры // Тр. 26-й российской научно-практической конференции «Инжиниринг предприятий и управление знаниями». М.: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова». 2023. – Т. 1. – С. 40-46.