

УДК 623.618

Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой

Одоевский С. М., Лебедев П. В.

Постановка задачи: функционирование инфокоммуникационных сетей специального назначения происходит в условиях воздействия множества дестабилизирующих факторов, в том числе вызванных деструктивным воздействием противника. Важную роль в обеспечении устойчивости функционирования данных сетей в условиях воздействия дестабилизирующих факторов играет система технологического управления, реализующая функции дистанционного контроля и изменения технического состояния сетевых элементов, включая функции обнаружения и резервирования элементов сети, вышедших из строя. При выборе структуры системы технологического управления необходимо иметь возможность оценки устойчивости её функционирования при выбранных параметрах собственной структуры с учетом влияния на устойчивость управляемой инфокоммуникационной сети с заданной топологической и функциональной структурой. Известные способы оценки устойчивости сетей связи сводятся, как правило, к расчетам структурной устойчивости отдельных направлений связи и не позволяют оценить общую структурную и функциональную устойчивость системы технологического управления и управляемой сети в целом. **Целью работы** является разработка методики оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой с учетом использования общих сетевых ресурсов и влияния устойчивости системы технологического управления на структурную и функциональную устойчивость всей сети. **Используемые методы:** для представления системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения использовалась графо-матричная модель. В качестве обобщенного показателя устойчивости функционирования системы технологического управления использовалась особая свертка частных показателей структурной и функциональной устойчивости отдельных технологических и информационных направлений связи, рассчитанных с учетом их относительной важности, влияющей на распределение сетевых ресурсов. **Новизна работы** заключается в отмеченном выше способе свертки частных показателей устойчивости, в соответствии с которым с помощью разработанной методики одновременно с оценкой устойчивости функционирования системы технологического управления выполняется обобщенная оценка устойчивости функционирования инфокоммуникационной сети в целом, что, с одной стороны, позволяет учитывать использование общих сетевых ресурсов, а с другой стороны, не позволяет считать функционирование системы технологического управления устойчивым, если при этом не будет устойчивым функционирование управляемой инфокоммуникационной сети. Кроме того, новым в составе предлагаемой методики является расчет частных показателей структурной устойчивости отдельных направлений с помощью предложенной процедуры обработки матриц сетевых элементов, входящих в основные и резервные маршруты, что позволяет достаточно просто учесть их корреляцию в виде поглощения общих элементов. **Результат:** подробно описана последовательная процедура расчета сначала частных показателей устойчивости отдельных направлений связи, отранжированных по важности, а затем обобщенных показателей устойчивости системы технологического управления и инфоком-

Библиографическая ссылка на статью:

Одоевский С. М., Лебедев П. В. Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 152-189. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10107.

Reference for citation:

Odoevsky S. M., Lebedev P. V. Method for estimating the stability of a system of technological management for a special purpose infocommunication network with a defined topological and functional structures. Systems of Control, Communication and Security, 2021, no. 1, pp.152-189 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10107.

муникационной сети сначала по отдельности, а потом совместно (с учетом взаимного влияния).
Практическая значимость: разработанная методика может быть использована при выборе структуры системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения, оптимальной по предлагаемому обобщенному показателю устойчивости функционирования.

Ключевые слова: функциональная и структурная устойчивость, методика, система технологического управления, обобщенный показатель.

Актуальность

Актуальность вопросов устойчивости связи обусловлена высокими требованиями к качеству обслуживания, предъявляемыми к современным инфокоммуникационным сетям специального назначения (ИКС СН) в условиях воздействия дестабилизирующих факторов (ДФ). В свою очередь основным инструментом повышения устойчивого функционирования ИКС СН является система управления, которая традиционно делится на 3 иерархически взаимосвязанные подсистемы: систему организационного управления (СОУ), систему оперативно-технического управления (СОТУ) и систему технологического управления (СТУ) [1]. При этом от устойчивости последней (нижней) подсистемы – СТУ, реализующей функции дистанционного контроля и изменения технического состояния сетевых элементов, в первую очередь зависит наблюдаемость и управляемость ИКС СН со стороны верхних подсистем СОТУ и СОУ, а, следовательно, и устойчивость функционирования данной сети в целом.

Под функционированием ИКС СН будем понимать процесс обслуживания элементами сети потоковых требований пользователей с требуемым качеством в условиях воздействия ДФ.

Стоит отметить, что ряд авторов [2-6] выделяет структурную и функциональную устойчивость. При рассмотрении структурной устойчивости учитываются топология сети, межэлементные связи и надежность характеристики сетевых элементов, вследствие чего задачи, связанные с анализом структурной устойчивости, можно свести к задачам оценки устойчивости топологических структур в условиях воздействия ДФ. При оценке функциональной устойчивости рассматривается способность ИКС СН достигать цели своего функционирования по обслуживанию информационных потоков данных (ПД), с требуемым качеством, а особенности топологии сети и межэлементных связей учитываются опосредованно, так как предполагается, что в ИКС СН уже обеспечивается связность работоспособных компонентов. Таким образом, под функциональной структурой в работе понимается структура потоков данных, которые требуется обслужить с заданным качеством функционирования.

Для оценки показателей структурной устойчивости отдельных информационных направлений можно использовать известные точные и приближенные методы расчета надежности и живучести двухполюсной сети, как частный случай многополюсной, рассмотренные в трудах Б.Я. Дудника [7], И.А. Ушакова [8], М.А. Коцыняк [9], А.А. Привалова [10], А.И. Осадчего [11], С.М. Одоевского [3], В.К. Попкова [12, 13], В.П. Блукке [14], С.И. Макаренко [2, 18],

М.М. Егунова [15], Д.В. Ландэ [16], А.Н. Назарова [4], А.И. Войцеховского [5], И.А. Мизина [19], а также в ГОСТ Р 53111–2008 [17] и др.

Практически все методы расчета структурной устойчивости являются переборными, т. е. предполагающими перебор различных сочетаний сетевых элементов, над которыми выполняются определенные математические (арифметические) или логические операции. Из-за того, что количество перебираемых сочетаний растет экспоненциально с ростом количества сетевых элементов, при анализе устойчивости больших сетей используются приближенные методы, позволяющие получить верхние и/или нижние граничные оценки.

Наиболее простым из точных методов является метод полного (прямого) перебора состояний всех сетевых элементов [7, 8, 19], но он же считается самым затратным по числу перебираемых сочетаний, уступая немного, как утверждается в [7], лишь методу прямого перебора путей. Более экономными с точки зрения времени вычислений являются методы с использованием теоремы разложения и методы с использованием преобразований булевой алгебры и символической логики [19]. Но их эффективность в значительной степени зависит от конкретной программной реализации отдельных этапов расчета. В качестве наиболее эффективного метода в [7] предлагается корреляционный метод, дополнительным достоинством которого является возможность вычисления условных вероятностей исправности каждого пути и оценки влияния обходных путей на величину оцениваемого показателя устойчивости.

Не смотря на отмеченные достоинства корреляционного метода, он редко используется на практике из-за сложной для программной реализации логики промежуточных преобразований и сложности дополнительного учета различных особенностей современных пакетных сетей (в [7] затрагиваются лишь некоторые особенности устаревших телефонных сетей). Более популярным является метод прямого перебора путей (простых цепей), который хорошо сочетается с простым учетом дополнительных ограничений, например, числа переприёмов, доступной и требуемой пропускной способности ребер, производительности вершин, частично проложенных маршрутов по разным критериям и др. Именно данный метод рекомендован для оценки соответствия сети электросвязи заданным требованиям обеспечения устойчивости её функционирования в ГОСТ Р 53111-2008 [17].

Метод количественной оценки связности между элементами графа с помощью перебора простых цепей заключается в том, что на построенном графе выделяют два полюса (две вершины – «исток» и «сток»). Далее для выбранных полюсов (далее в статье они называются корреспондирующей парой узлов (КПУ)), в соответствии с правилами установления связи, отмечаются все цепи (или пути), по которым может быть установлено соединение. Под событием связности понимают такое событие, когда между «истоком» и «стоком» в работоспособном состоянии существует хотя бы одна простая цепь. Если между выбранными полюсами в работоспособном состоянии нет ни одной простой цепи, то в двухполюсной сети наступает событие несвязности. Под «простой цепью» понимают последовательность ребер и вершин графа без петель и па-

раллелей, замыкающую полюсы (КПУ) между собой. Далее на графе выделяют все простые цепи $\{\mu_{i,j}\}$ между выделенной парой полюсов (узлов) X_i и X_j .

При заданных коэффициентах готовности для всех элементов графа связность двухполюсной сети между выделенными узлами X_i и X_j в соответствии с [17] рассчитывается методом объединения простых цепей с учетом эффекта поглощения.

Связностью $p_{i,j}^{(l)}$ l -го пути $\mu_{i,j}^{(l)}$ из перечня всех цепей $\mu_{i,j}$ называется совместная вероятность исправного состояния всех ребер и вершин, образующих эту цепь:

$$p_{i,j}^{(l)} = \prod_{\forall a \in \mu_{i,j}^{(l)}} p_a, \quad (1)$$

где p_a – коэффициент готовности a -го элемента последовательности ребер и вершин, принадлежащих пути $\mu_{i,j}^{(l)}$.

Вероятность связности $p_{i,j}$ КПУ X_i и X_j – это вероятность исправного состояния хотя бы одной цепи из всех возможных цепей $\mu_{i,j}$ между ними:

$$p_{i,j} = p_{i,j}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{i,j}^{(l)} \in \mu_{i,j}} (1 - p_{i,j}^{(l)}). \quad (2)$$

В реальных условиях цепи часто взаимозависимы, т. е. имеют общие ребра и вершины. При этом вероятность связности, вычисленная по формуле (2), имеет завышенное значение. Действительное значение получится, если при вычислениях по формуле (2) после раскрытия скобок все члены, имеющие показатели степени больше единицы, заменить на единицу, что соответствует исключению события многократного учета коэффициента готовности одного ребра или одной вершины. Такое действие обозначают символом E и называют поглощением [17]. При этом формула для вычисления связности принимает следующий вид:

$$p_{i,j} = E \left\{ p_{i,j}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{i,j}^{(l)} \in \mu_{i,j}} (1 - p_{i,j}^{(l)}) \right\}. \quad (3)$$

Число перемножаемых сомножителей в формулах (2) и (3) равно числу простых цепей, а число перемножаемых сомножителей в формуле (1) равно числу ребер и вершин в одной цепи.

Приведенные в [17] формулы (1)–(3) достаточно полно отражают общий смысл вычислений для автоматизированного расчета устойчивости направлений связи, но остаются неясными конкретные математические действия, обозначенные в формуле (3) символом E .

Кроме того, в ГОСТ Р 53111-2008 [17], не смотря на название «Устойчивость...сети...», не приводится метод расчета обобщенного показателя устойчивости всей сети (многополюсной), а есть только формулы расчета устойчивости (связности) отдельных КПУ (двухполюсных подсетей), т. е. фактически частных показателей устойчивости сети.

Отсутствие гостированного метода расчета обобщенного показателя устойчивости всей сети оставляет право использовать для этой цели любой

подходящий метод свертки частных показателей, соответствующий смыслу решаемой задачи принятия решений с учетом конкретных особенностей построения и функционирования рассматриваемой сети, в том числе с учетом дополнительных характеристик, не относящихся непосредственно к структурной устойчивости. В частности, при оценке устойчивости функционирования ИКС СН необходимо, как уже отмечалось выше, кроме структурной устойчивости учитывать и функциональную устойчивость, отражающую степень достижения цели функционирования сети по обслуживанию информационных потоков с требуемым качеством.

Традиционная оценка структурной и функциональной устойчивости сетей связи известными методами предполагает условно идеальное управление, не потребляющее никаких ресурсов и реализующее все предполагаемые действия по резервированию отказавших сетевых элементов и переключению информационных потоков данных по новым маршрутам. Однако на самом деле реальная СТУ для передачи служебной информации (технологических ПД) потребляет сетевые ресурсы ИКС СН и использует сетевые элементы, которые могут выходить из строя, причем это, как правило те же сетевые элементы, которые используются и для обслуживания информационных потоков.

Для оценки устойчивости СТУ, как самостоятельной сети, можно использовать те же методы, как и для отдельной ИКС СН. Но тогда остается неясным, каким обобщенным показателем устойчивости можно адекватно учесть взаимосвязь характеристик данных сетей между собой.

Отличительной особенностью предлагаемой методики оценки устойчивости СТУ ИКС СН является то, что одновременно с оценкой устойчивости функционирования СТУ выполняется обобщенная оценка устойчивости функционирования ИКС СН, что, с одной стороны, позволяет учитывать использование общих сетевых ресурсов (элементов) и в СТУ, и в ИКС СН, а с другой стороны, не позволяет считать функционирование СТУ устойчивым, если при этом не будет устойчивым функционирование управляемой ИКС СН.

Постановка задачи

Из приведенного выше обоснования актуальности разработки методики оценки устойчивости функционирования СТУ ИКС СН с заданной топологической и функциональной структурой вытекает следующая постановка задачи.

Разработать методику A оценки устойчивости функционирования СТУ ИКС СН с заданной топологической G и функциональной Λ структурой в условиях U по обобщенным показателям Q в виде определенной вычислительной процедуры

$$A: \{G, \Lambda, U\} \rightarrow Q \quad (4)$$

последовательного вычисления промежуточных частных показателей устойчивости (ЧПУ) p отдельных КПУ СТУ и ИКС СН (с учетом используемых элементов и ресурсов сети $g \in G$ при обслуживании отдельных технологических и информационных потоков $\lambda \in \Lambda$ при действующих на них дестабилизирующих факторах с параметрами $u \in U$, проявляющихся, в частности, в объектовой

устойчивости отдельных сетевых элементов) и итоговых обобщенных показателей устойчивости (ОПУ) функционирования $Q = \{Q_{СТУ}, Q_{ИКС}, Q_{СТУ_{ИКС}}\}$ (отдельно для СТУ $Q_{СТУ}$ и ИКС СН $Q_{ИКС}$, а также совместно $Q_{СТУ_{ИКС}}$) при различных заданных исходных данных о параметрах топологической структуры сети G , параметрах функциональной структуры (обслуживаемого трафика) Λ и параметрах дестабилизирующих факторов U .

Цель работы – разработка методики оценки частных и обобщенных показателей устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой с учетом использования общих сетевых ресурсов и влияния устойчивости системы технологического управления на структурную и функциональную устойчивость всей сети.

Основные этапы расчетов отражены на рис. 1 в виде обобщенной методики оценки устойчивости функционирования СТУ ИКС СН.

Исходными данными в обобщенной методике (блок 1) являются: оргграф топологической структуры ИКС СН $G(X, E)$, где X – множество вершин, E – множество ребер, множество C пропускных способностей сетевых элементов (вершин и ребер) $c \in C$, множество Λ технологических и информационных потоков данных $\lambda \in \Lambda$, множество m параметров структуры СТУ $m \in m$ и множество U параметров дестабилизирующих факторов, действующих на отдельные элементы $u \in U$ (в виде коэффициентов готовности сетевых элементов, зависящих от этих ДФ).

Обобщенная методика на рис. 1 отражает основную отличительную особенность расчетов с учетом причинно-следственных связей динамически распределяемых сетевых ресурсов ПС, доступных отдельным КПУ с учетом их принадлежности сначала к СТУ (блоки 2–9), а затем к ИКС СН (блоки 10–18). При этом распределение сетевых ресурсов между отдельными КПУ предполагается в порядке убывания их важности, учитываемой рангами (в виде индексов элементов используемых множеств) $rt=1, \dots, rt_{max}$ для КПУ СТУ и $ri=rt_{max}+1, \dots, ri_{max}$ для КПУ ИКС СН.

В соответствии с данной обобщенной методикой достижение указанной выше цели работы в виде обобщенной формализованной постановки задачи (4) обеспечивается последовательным решением следующих частных задач:

1) разработкой графо-матричной модели СТУ и ИКС СН, используемой при вводе исходных данных (блок 1), считывании их в ходе расчетов (блоки 3, 8, 11, 16), а также для хранения промежуточных результатов, рассчитываемых и используемых в блоках 4, 5, 9, 12, 13, 17, 18;

2) разработкой частной методики расчета маршрутов между КПУ СТУ и КПУ ИКС СН (блоки 4, 12);

3) разработкой частной методики расчета частных показателей структурной и функциональной устойчивости технологических и информационных направлений связи между КПУ СТУ и между КПУ ИКС СН, соответственно (блоки 5, 13);

4) разработкой частной методики расчета обобщенных показателей структурной и функциональной устойчивости ИКС СН и СТУ, а именно, обобщенного показателя структурной и функциональной устойчивости автономной СТУ (блок 9), обобщенного показателя устойчивости ИКС СН без учета работы СТУ (блок 17) и обобщенного показателя устойчивости ИКС СН с пересчетом коэффициентов готовности всех сетевых элементов с учетом рассчитанной устойчивости их соединений (технологических направлений связи) с управляемыми объектами СТУ (блок 18).

Красным цветом на рис. 1 выделены блоки, содержание которых более подробно раскрывается далее при описании частных методик.

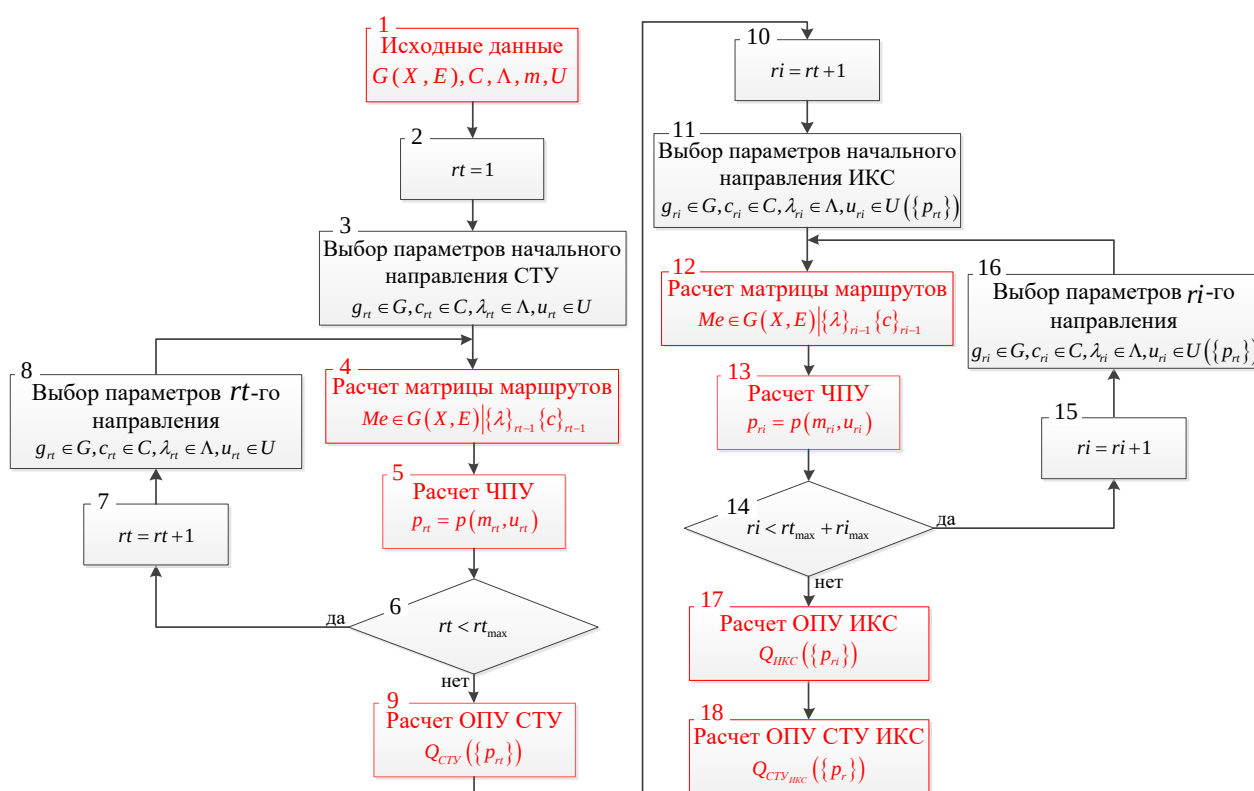


Рис. 1. Обобщенная методика оценки устойчивости функционирования СТУ ИКС СН

1. Графо-матричная модель СТУ и ИКС СН

Важное значение для упрощения вычислений имеет структура используемых исходных данных и результатов расчета (промежуточных и итоговых). Данная структура в настоящей работе определяется графо-матричной моделью СТУ и ИКС СН, которая позволяет представить исходные и промежуточные (итоговые) графы с заданными и рассчитываемыми параметрами отдельных ребер, вершин и подграфов в виде некоторого множества матриц и векторов определенного вида (формы).

В качестве примера при описании предлагаемой графо-матричной модели (и для сравнения) в качестве графа ИКС СН (рис. 2а) был взят граф телекоммуникационной сети (ТКС), приведенный на рис. 6 в статье [18].

Однако направленные ребра данного орграфа не позволяют выделить из него подграф, адекватно отражающий структуру СТУ, включающую замкнутые контуры управления всеми сетевыми элементами, размещенными в вершинах графа $\{X_1, \dots, X_6\}$, со стороны управляющих объектов СТУ, размещенных в отдельных из данных вершин в соответствии с заданными (анализируемыми) параметрами структуры СТУ m (см. выше постановку задачи).

В настоящей статье предполагается, что к объектам (элементам) СТУ относятся оконечные станции (ОС), выполняющие роль агентов СТУ и размещаемые на всех узлах (в вершинах графа $\{X_1, \dots, X_6\}$). На одном из узлов располагается центральная станция (ЦС), выполняющая роль основного менеджера СТУ. Кроме того, в состав СТУ дополнительно могут входить вспомогательные (промежуточные) накопительные станции (НС), размещаемые на узлах, отличных от узла, на котором размещается ЦС, выполняющие роль вспомогательных (промежуточных) менеджеров-агентов, которые управляют группой подчиненных ОС, а также могут резервировать друг друга и ЦС. В случае использования НС, например, в количестве $K_{нс}$, все ОС распределяются между $K_{нс}+1$ группами и закрепляются: $K_{нс}$ групп – за своими НС и одна группа – за ЦС. Соответственно, граф СТУ должен включать ребра, позволяющие образовать замкнутые контуры управления – технологические направления связи – между НС (ЦС) и всеми ОС в их группах, а также между ЦС и всеми НС.

Для реализации функций СТУ граф ИКС СН, изображенный на рис. 2а, был дополнен недостающими ребрами и принял вид графа СТУ ИКС СН, приведенный на рис. 2б. Красным цветом на данном рисунке подкрашен узел X_1 , на котором размещается ЦС, зеленым цветом подкрашен узел X_3 , на котором размещается НС. Пунктиром обведены две группы вершин, на которых размещаются ОС, управляемые со стороны ЦС и НС.

После дополнения исходного подграфа указанными выше недостающими ребрами получился полноценный пример графа ИКС СН, в котором могут выполняться и функции СТУ по передаче технологических ПД (есть замкнутые маршруты по прежним и новым ребрам), и функции ИКС СН по передаче информационных ПД (остались прежние маршруты, причем только по ребрам исходного подграфа (рис. 2а) за счет специально подобранных пропускных способностей, рассмотренных далее). С точки зрения структуры графов в данном случае получилось, что граф ИКС СН является подграфом более общего графа СТУ ИКС СН. Для рассматриваемой методики – это не важно. Важно, чтобы в качестве исходного был задан любой более общий граф, включающий и ИКС СН, и СТУ ИКС СН. В данном случае это граф на рис. 2б. Согласно предлагаемой графо-матричной модели все параметры данного графа, необходимые для дальнейших расчетов, представляются в виде следующих матриц и векторов.

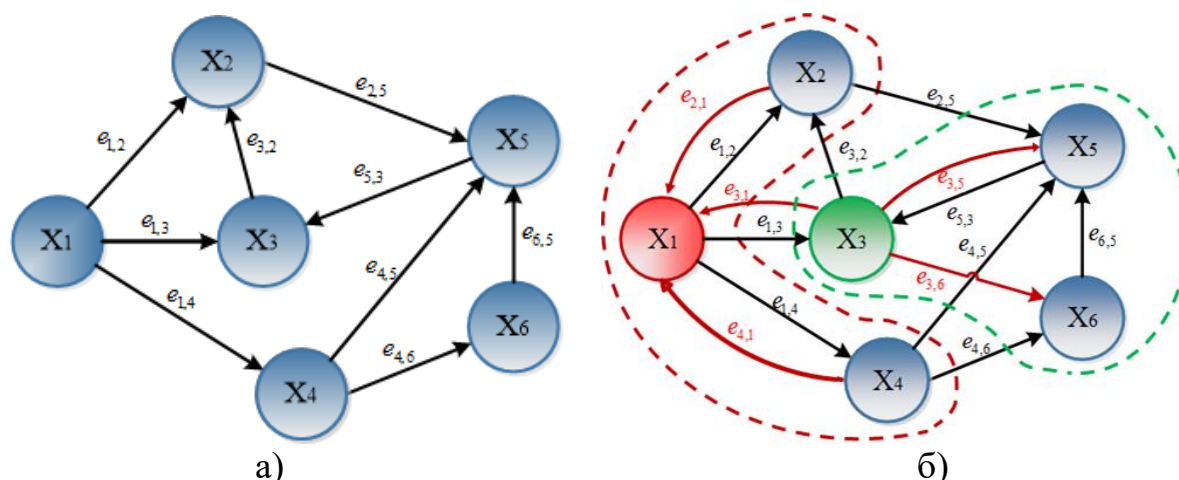


Рис. 2. Пример графического представления структуры СТУ ИКС СН $G(X, E)$

1. $\mathbf{Ge} = \{Ge_{ij}\}$ – матрица смежности, включающая признаки наличия узловых и линейных сетевых элементов, соединяющих вершины графа (узлы) $i=1, \dots, N, j=1, \dots, N$, где N – общее количество вершин (узлов). Матрица смежности $\mathbf{Ge}$, соответствующая графу на рис. 2б, приведена в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Матрица смежности $\mathbf{Ge}$

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	1	1	1	1	0	0
X_2	1	1	0	0	1	0
X_3	1	1	1	0	1	1
X_4	1	0	0	1	1	1
X_5	0	0	1	0	1	0
X_6	0	0	0	0	1	1

Единичным элементам $Ge_{ij}=1$ матрицы смежности $\mathbf{Ge}$ соответствуют присутствующие сетевые элементы (с индексами i, j), а нулевым $Ge_{ij}=0$ – отсутствующие.

2. $\mathbf{Gc} = \{Gc_{ij}\}, i=1, \dots, N, j=1, \dots, N$ – матрица пропускных способностей сетевых элементов. Для упрощения примера исходных данных выберем в качестве единицы измерения пропускной способности скорость основного цифрового канала (ОЦК), равную 64 кбит/с, с общепринятым обозначением $E0$. Для примера, предположим, что все ребра ИКС СН (рис. 2а) имеют одинаковую пропускную способность $10E0$, дополнительные ребра СТУ (выделены на рис. 2б красным цветом) имеют пропускную способность $2E0$, а все вершины имеют пропускную способность $20E0$ (с запасом для транзита и внутреннего трафика). Матрица пропускных способностей $\mathbf{Gc}$, соответствующая графу на рис. 2б, с учетом вышесказанного приведена в виде таблицы 2. Отсутствующим ребрам в матрице соответствует нулевая пропускная способность.

Таблица 2 – Матрица пропускных способностей G_c в единицах Е0

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	20	10	10	10	0	0
X_2	2	20	0	0	10	0
X_3	2	10	20	0	2	2
X_4	2	0	0	20	10	10
X_5	0	0	10	0	20	0
X_6	0	0	0	0	10	20

3. $G_p = \{G_{p_{ij}}\}$, $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, N$, – матрица коэффициентов готовности сетевых элементов. Для примера предположим, что все вершины имеют одинаковые коэффициенты готовности 0,999 за исключением первой, выполняющей функции ЦС, которая считается идеальной ($K_r=1$), а ребра имеют другие (но тоже одинаковые) коэффициенты 0,9. Матрица коэффициентов готовности G_p , соответствующая графу на рис. 2б, с учетом вышесказанного приведена в виде таблицы 3. Отсутствующим ребрам в матрице соответствуют нулевые значения коэффициентов готовности.

Таблица 3 – Матрица коэффициентов готовности сетевых элементов G_p

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	1	0,9	0,9	0,9	0	0
X_2	0,9	0,999	0	0	0,9	0
X_3	0,9	0,9	0,999	0	0,9	0,9
X_4	0,9	0	0	0,999	0,9	0,9
X_5	0	0	0,9	0	0,999	0
X_6	0	0	0	0	0,9	0,999

Следует отметить, что коэффициенты готовности ребер графа СТУ ИКС СН, могут задаваться с учетом прогнозируемых результатов воздействия средств радиоэлектронного подавления, а коэффициенты готовности вершин – с учетом прогнозируемых результатов воздействия средств огневого поражения. Кроме того, матрицы пропускных способностей вершин и ребер (см. выше) могут задаваться с учетом прогнозируемых последствий воздействия компьютерных атак, которые могут приводить к снижению доступной пропускной способности сетевых элементов ИКС СН. Таким образом, методика позволяет учесть широкий спектр ДФ U , отражающих возможное воздействие противника.

4. $V_m = \{V_{m_{ij}}\}$, $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, N$, – матрица весовых коэффициентов сетевых элементов. Это вспомогательная матрица, которая используется при оценке условной длины маршрутов между КПУ в виде суммарного веса сетевых элементов, входящих в маршрут. В частном случае она может совпадать с матрицей смежности (когда каждый сетевой элемент имеет вес, равный 1). Для удобства сравнения результатов предположим для примера, что веса сетевых элементов графа ИКС СН на рис. 2а равны весам, назначенным таким же сетевым элементам в таком же графе ТКС в [18]. Матрица весовых коэффициентов V_m , соответствующая графу на рис. 2а, с учетом вышесказанного приведена в виде таблицы 4а.

Таблица 4а – Матрица весовых коэффициентов Vm для графа ИКС СН

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	0	5	2	3	∞	∞
X_2	∞	0	∞	∞	7	∞
X_3	∞	2	0	∞	∞	∞
X_4	∞	∞	∞	0	1	2
X_5	∞	∞	2	∞	0	∞
X_6	∞	∞	∞	∞	3	0

Следует отметить, что вес маршрутов, вычисляемый на основании матрицы Vm , в предлагаемой методике не является определяющим при выборе маршрутов, хотя и влияет на их ранжировку по предпочтительности. Основным фактором, влияющим на окончательное множество маршрутов, учитываемых при расчете устойчивости направлений связи между очередной КПУ, является достаточность их ПС для обслуживания заданных потоков данных (см. далее) между данными узлами. Если требуемая ПС маршрутов для обслуживания заданных потоков будет превышать доступную для них ПС ребер, входящих в предварительно отобранные маршруты с минимальным или допустимым суммарным весом, то эти ребра не будут учитываться, даже если их веса будут минимальными, например, равными 1. Поэтому, добавив эти минимальные веса в матрицу Vm для дополнительных ребер графа СТУ ИКС СН, можно использовать эту матрицу (табл. 4б) и при формировании маршрутов для ИКС СН, гарантируя, что эти ребра не будут использоваться для информационных ПД.

Таблица 4б – Матрица весовых коэффициентов Vm для графа СТУ ИКС СН

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	0	5	2	3	∞	∞
X_2	1	0	∞	∞	7	∞
X_3	1	2	0	∞	1	1
X_4	1	∞	∞	0	1	2
X_5	∞	∞	2	∞	0	∞
X_6	∞	∞	∞	∞	3	0

5. $GN=\{GN_{ij}\}$, $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, N$, – матрица нумерации сетевых элементов, включающая уникальные (порядковые) номера (идентификаторы) всех сетевых элементов $GN_{ij} \in X=\{X_1, \dots, X_K\}$, где K – общее количество сетевых элементов (вершин/узлов и ребер/линий), причем $N \leq K \leq N^2$. Это вспомогательная матрица, но в отличие от предыдущей (необязательной) вспомогательной матрицы весов, данная матрица является важным (обязательным) элементом рассматриваемой графо-матричной модели, необходимым для всех последующих вычислений. Данная матрица позволяет перейти от матричного представления элементов всех графов к векторному, что упрощает многие операции, связанные с упорядоченным перебором сетевых элементов. В общем случае не принципиально, в какой последовательности нумеровать все сетевые элементы. Учитывая, что вершины графа уже пронумерованы последовательно, целесооб-

разно эти номера за ними и оставить, а дальше продолжить нумерацию ребер, например, сначала направленных в одну сторону, а затем в другую. Вариант такой сквозной нумерации $\{X_1, \dots, X_{20}\}$ всех элементов графа СТУ ИКС СН приведен на рис. 3а.

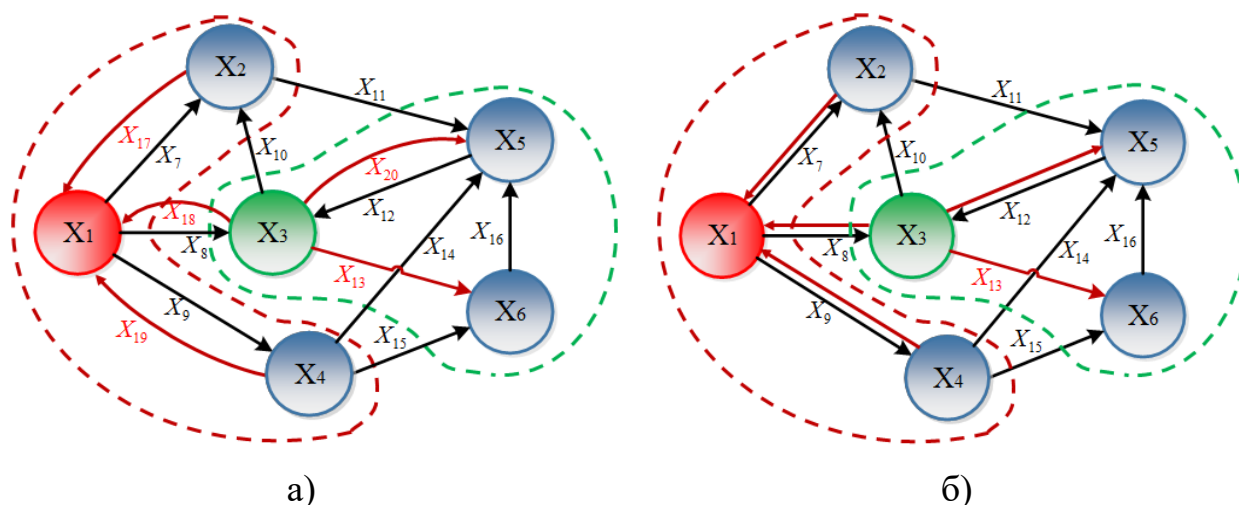


Рис. 3. Пример графического представления структуры СТУ ИКС СН со сквозной нумерацией всех сетевых элементов

Недостатком произвольной сквозной нумерации направленных ребер является сложность логического учета физической близости и корреляции характеристик встречных ребер между двумя соседними узлами. Кроме того, индивидуальная нумерация встречных ребер является явно избыточной для графов с ненаправленными ребрами. Поэтому в предлагаемой графо-матричной модели используется упрощенная (сокращенная) сквозная нумерация ребер независимая от их направленности, т. е. с одинаковыми номерами у встречных ребер (если таковые есть) между соседними узлами. Вариант такой сквозной нумерации $\{X_1, \dots, X_{16}\}$ всех элементов графа СТУ ИКС СН приведен на рис. 3б.

В таблицах 5а и 5б представлены два варианта заполнения матрицы нумерации сетевых элементов GN , соответствующие графам на рис. 3а и 3б. При использовании предлагаемого второго варианта заполнения матрицы GN (рис. 3б и табл. 5б), на первый взгляд, теряется информация о направленности ребер. Но в предлагаемой графо-матричной модели эта информация учитывается не в этой, а в других матрицах (см. далее).

6. Информация об индивидуальных характеристиках отдельных направленных (встречных) ребер берется из исходных квадратных матриц Gc , Gp и Vm , в которых эта информация есть, и сохраняется в парных векторах пропускной способности $cN = \{cN_{k,1}, cN_{k,2}\}$, коэффициентов готовности $pN = \{pN_{k,1}, pN_{k,2}\}$ и весовых коэффициентов $vN = \{vN_{k,1}, vN_{k,2}\}$, в которых нумерация $k=1, \dots, K$ парных элементов векторов соответствует нумерации элементов графа в матрице GN с ненаправленными ребрами (табл. 5б). В таблице 6 приведены примеры сформированных парных векторов cN , pN и vN в соответствии с матрицей GN (табл. 5б) и исходными матрицами пропускной способности Gc (табл. 2), коэффициентов готовности Gp (табл. 3) и весовых коэффициентов Vm (табл. 4б).

Таблица 5а – Матрица GN с учетом направленности ребер

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	1	7	8	9	0	0
X_2	17	2	0	0	11	0
X_3	18	10	3	0	20	13
X_4	19	0	0	4	14	15
X_5	0	0	12	0	5	0
X_6	0	0	0	0	16	6

Таблица 5б – Матрица GN без учета направленности ребер

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	1	7	8	9	0	0
X_2	7	2	10	0	11	0
X_3	8	10	3	0	12	13
X_4	9	0	0	4	14	15
X_5	0	11	12	14	5	16
X_6	0	0	13	15	16	6

Таблица 6 – Парные векторы параметров сетевых элементов СТУ ИКС СН

cN			pN			vN		
k	$cN_{k,1}$	$cN_{k,2}$	k	$pN_{k,1}$	$pN_{k,2}$	k	$vN_{k,1}$	$vN_{k,2}$
1	20	20	1	1	1	1	0	0
2	20	20	2	0,999	0,999	2	0	0
3	20	20	3	0,999	0,999	3	0	0
4	20	20	4	0,999	0,999	4	0	0
5	20	20	5	0,999	0,999	5	0	0
6	20	20	6	0,999	0,999	6	0	0
7	10	2	7	0,9	0,9	7	5	1
8	10	2	8	0,9	0,9	8	2	1
9	10	2	9	0,9	0,9	9	3	1
10	0	10	10	0	0,9	10	∞	2
11	10	0	11	0,9	0	11	7	∞
12	2	10	12	0,9	0,9	12	∞	2
13	2	0	13	0,9	0	13	1	∞
14	10	0	14	0,9	0	14	1	∞
15	10	0	15	0,9	0	15	2	∞
16	0	10	16	0	0,9	16	∞	3

Элементы с номерами $k > N$ парных векторов с индексом 1 соответствуют ребрам, направленным от узлов с меньшим номером к узлам с большим номером (элементы исходных квадратных матриц выше и правее диагонали), а элементы с индексом 2 наоборот – от узлов с большим номером к узлам с меньшим номером (элементы исходных квадратных матриц ниже и левее диагонали). Элементы с номерами $k \leq N$ парных векторов с обоими индексами соответствуют узлам с теми же номерами (элементы исходных квадратных матриц на главной диагонали) и дублируют друг друга (это избыточно, но упрощает перебор элементов с разными индексами без дополнительного логического контроля).

7. $GT\lambda = \{GT\lambda_{i,j}\}$ и $GI\lambda = \{GI\lambda_{i,j}\}$, $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, N$, – матрицы технологических потоков между КПУ СТУ ИКС СН и информационных потоков между КПУ ИКС СН, соответственно, в единицах требуемой пропускной способности с необходимым запасом на пульсации трафика, гарантирующим требуемое качество обслуживания с учетом используемых сетевых механизмов управления трафиком.

Для примера предположим, что в СТУ между ЦС на X_1 и НС на X_3 в обе стороны требуется обеспечить технологический поток величиной 1Е0. Такой же (дуплексный) поток 1Е0 пусть требуется обеспечить между ЦС на X_1 и подчиненными ей ОС X_2, X_4 , а также между НС на X_3 и подчиненными ей ОС X_5, X_6 . Будем также полагать, что существуют такие же внутренние технологические потоки запросов и ответов между ЦС и X_1 , а также между НС и X_3 . Заполненная указанными значениями требуемой ПС матрица технологических потоков представлена в таблице 7а.

В ИКС СН для примера зададим величину отдельных информационных потоков 4Е0 между всеми КПУ, которые могут иметь соединение с учетом направленности ребер исходного графа (рис. 2а). Заполненная таким образом матрица информационных потоков представлена в таблице 7б.

Таблица 7а – Матрица **GTλ**

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	2	1	1	1	0	0
X_2	1	0	0	0	0	0
X_3	1	0	2	0	1	1
X_4	1	0	0	0	0	0
X_5	0	0	1	0	0	0
X_6	0	0	1	0	0	0

Таблица 7б – Матрица **GIλ**

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	0	4	4	4	4	4
X_2	0	0	4	0	4	0
X_3	0	4	0	0	4	0
X_4	0	4	4	0	4	4
X_5	0	4	4	0	0	0
X_6	0	4	4	0	4	0

8. $RT = \{RT_{ij}\}$ и $RI = \{RI_{ij}\}$, $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, N$, – матрицы приоритетов технологических потоков между КПУ СТУ ИКС СН и информационных потоков между КПУ ИКС СН, соответственно. Данные матрицы относятся к исходным данным, которые существенным образом влияют на результаты расчетов частных и обобщенных показателей устойчивости функционирования СТУ ИКС СН в соответствии с предлагаемой методикой, особенно при недостаточных сетевых ресурсах, поскольку влияют на перераспределение ПС и маршрутов в пользу более важных потоков. При заполнении матриц **RT** и **RI** используется сквозная нумерация приоритетов, причем матрица **RT** содержит меньшие значения (более высокий приоритет), чем матрица **RI**, поскольку, предполагается, что при невыполнении требований к качеству обслуживания технологических потоков СТУ не сможет поддерживать нужное динамическое управление сетевыми ресурсами ИКС в условиях воздействия ДФ и требования к качеству обслуживания информационных потоков не будут выполнены.

Для примера предположим, что наивысший первый приоритет имеет технологический поток между ЦС X_1 и НС X_3 . Технологические потоки между остальными объектами СТУ ЦС – ОС и НС – ОС пусть имеют второй приоритет. А всем информационным потокам назначим одинаковый третий приоритет. Заполненные таким образом матрицы приоритетов технологических и информационных потоков представлены в таблицах 8а и 8б.

Таблица 8а – Матрица **RT**

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	2	2	1	2	0	0
X_2	2	0	0	0	0	0
X_3	1	0	2	0	0	0
X_4	2	0	0	0	2	2
X_5	0	0	0	2	0	0
X_6	0	0	0	2	0	0

Таблица 8б – Матрица **RI**

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	0	3	3	3	3	3
X_2	0	0	3	0	3	0
X_3	0	3	0	0	3	0
X_4	0	3	3	0	3	3
X_5	0	3	3	0	0	0
X_6	0	3	3	0	3	0

9. **RTS** = { RT_{rt} , $XT_{rt,1}$, $XT_{rt,2}$ } и **RIS** = { RI_{ri} , $XI_{ri,1}$, $XI_{ri,2}$ }, – тройные векторы очередности технологических $rt = 1, \dots, rt_{max}$, и информационных $ri = 1, \dots, ri_{max}$, потоков, соответственно. Это вспомогательные векторы, которые формируются на основании матриц приоритетов **RT** и **RI**, ранжируя все потоки и соответствующие им КПУ СТУ ($XT_{rt,1}$, $XT_{rt,2}$) и ($XI_{ri,1}$, $XI_{ri,2}$) ИКС СН по убыванию важности, что соответствует возрастанию (точнее неубыванию) номеров приоритета RT_{rt} и RI_{ri} , соответственно. При одинаковых приоритетах очередность КПУ определяется очередностью их расположения в матрицах приоритетов. При этом встречные потоки между одной и той же КПУ (если они есть и имеют равный приоритет) располагаются в очереди обязательно рядом. Внутренние потоки в узлах тоже включаются в очередь (если они заданы). Количество КПУ СТУ KT и ИКС СН KI соответствует количеству ненулевых значений в матрицах **RT** и **RI** или **GTλ** и **GIλ**. В рассматриваемом примере $rt_{max} = 12$ и $ri_{max} = 18$. Векторы **RTS** и **RIS** очередности технологических и информационных потоков, соответствующие матрицам приоритетов, приведенным в таблицах 8а и 8б, представлены в таблицах 9а и 9б.

Индексы 1 и 2 в обозначениях номеров КПУ ($XT_{rt,1}$, $XT_{rt,2}$) и ($XI_{ri,1}$, $XI_{ri,2}$) соответствуют направлению потока (от узла с индексом 1 к узлу с индексом 2). Номера элементов $rt = 1, \dots, rt_{max}$, вектора **RTS** и $ri = 1, \dots, ri_{max}$, вектора **RIS** соответствуют условной сетевой очередности обслуживания КПУ, в соответствии с которой, согласно предлагаемой методике, при анализе устойчивости функционирования очередной КПУ учитываются доступные сетевые ресурсы ПС ребер и узлов графа СТУ ИКС СН, оставшиеся после выделения части данных ресурсов для уже учтенных (условно обслуженных) КПУ.

Таблица 9а – Вектор очередности технологических потоков **RTS**

rt	RT_{rt}	$XT_{rt,1}$	$XT_{rt,2}$	rt	RT_{rt}	$XT_{rt,1}$	$XT_{rt,2}$	rt	RT_{rt}	$XT_{rt,1}$	$XT_{rt,2}$
1	1	1	3	5	2	2	1	9	2	3	5
2	1	3	1	6	2	1	4	10	2	5	3
3	2	1	1	7	2	4	1	11	2	3	6
4	2	1	2	8	2	3	3	12	2	6	3

Таблица 9б – Вектор очередности информационных потоков **RIS**

ri	RI_{ri}	$XI_{ri,1}$	$XI_{ri,2}$	ri	RI_{ri}	$XI_{ri,1}$	$XI_{ri,2}$	ri	RI_{ri}	$XI_{ri,1}$	$XI_{ri,2}$
1	3	1	2	7	3	3	2	13	3	3	5
2	3	1	3	8	3	4	2	14	3	5	3
3	3	1	4	9	3	2	5	15	3	6	3
4	3	1	5	10	3	5	2	16	3	4	5
5	3	1	6	11	3	6	2	17	3	4	6
6	3	2	3	12	3	4	3	18	3	6	5

10. $G_s = \{G_{s_k, s}\}$, $k=1, \dots, K$, $s=1, \dots, S$, – матрица соседства сетевых элементов СТУ ИКС СН. Это вспомогательная матрица, которая формируется на основании исходной матрицы смежности **Ge** и используется в дальнейшем для упрощения процедуры формирования маршрутов. Количество строк матрицы K соответствует количеству всех сетевых элементов (вершин и ребер графа), т. е. равно количеству элементов в векторах cN , pN и vN . В рассматриваемом примере $K = 16$ (табл. 6). Количество столбцов S соответствует максимальному количеству соседних элементов у отдельных сетевых элементов плюс 1. В первой колонке каждой строки, соответствующей очередному сетевому элементу с номером $k=1, \dots, K$, записывается количество соседних сетевых элементов $G_{s_k, 1}$, а в следующих колонках $G_{s_k, 2}, \dots, G_{s_k, S_k}$, $1 \leq S_k \leq S$, – номера этих сетевых элементов. Пример матрицы соседства **Gs**, сформированной на основании матрицы смежности **Ge** (табл. 1), представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Матрица соседства сетевых элементов **Gs**

s	1	2	3	4	5
X_1	3	7	8	9	0
X_2	3	7	10	11	0
X_3	4	8	10	12	13
X_4	3	9	14	15	0
X_5	4	11	12	14	16
X_6	3	13	15	16	0
X_7	2	1	2	0	0
X_8	2	1	3	0	0
X_9	2	1	4	0	0
X_{10}	2	2	3	0	0
X_{11}	2	2	5	0	0
X_{12}	2	3	5	0	0
X_{13}	2	3	6	0	0
X_{14}	2	4	5	0	0
X_{15}	2	4	6	0	0
X_{16}	2	5	6	0	0

Из таблицы 10 видно, что в матрице соседства **Gs** у вершин графа (с номерами $k=1, \dots, 6$) соседями могут быть только ребра (с номерами $k=7, \dots, 16$), количество которых может быть разным у разных вершин (от 3-х до 4-х в данном случае), а у ребер соседями могут быть только вершины, число которых всегда равно двум. При этом номера соседних (с ребром) вершин в колонках 2 и 3

всегда расположены по возрастанию. Это направление (от узла с меньшим номером к узлу с большим номером) при использовании ребер в процессе формирования маршрутов считается положительным, а обратное – отрицательным. Данное условие позволяет однозначно идентифицировать параметры встречных ребер в двумерных векторах пропускной способности cN , коэффициентов готовности pN и весовых коэффициентов vN .

Все описанные выше матрицы и векторы графо-матричной модели содержат или непосредственно исходные данные, или те же исходные данные, но преобразованные к виду, удобному для дальнейших расчетов.

К графо-матричной модели относятся также матрицы и векторы с промежуточными и итоговыми результатами расчетов, в частности:

$Me = \{Me_{l,k}\}$ – текущая матрица сетевых элементов $k = 0, \dots, K$, входящих в отобранные маршруты $l = 1, \dots, L$ (основной и резервные) между очередной анализируемой КПУ. В колонке $k = 0$ данной матрицы записывается суммарный вес элементов, входящих в каждый маршрут $l = 1, \dots, L$.

$Z = \{Z_{k,1}, Z_{k,2}\}$ – текущий (или итоговый) парный вектор загрузки сетевых элементов $k = 1, \dots, K$, после анализа очередной КПУ.

$P = \{p_{i,j}\}$, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, N$ – текущая (или итоговая) матрица частных показателей функциональной и структурной устойчивости направлений связи между всеми КПУ после анализа очередной КПУ СТУ или ИКС СН.

Структура данных матриц и векторов, а также особенности их заполнения и использования будут рассмотрены далее при описании методик расчета маршрутов, частных и обобщенных показателей устойчивости функционирования СТУ ИКС СН.

2. Частная методика расчета маршрутов между КПУ СТУ и КПУ ИКС СН

Разработка частной методики расчета маршрутов между КПУ СТУ и КПУ ИКС СН является второй частной задачей, решаемой в настоящей работе, в соответствии с общей постановкой задачи, сформулированной в начале статьи.

Следует сразу оговориться, что в настоящей статье, в первую очередь, решается задача анализа (оценки устойчивости), а не синтеза (повышения или обеспечения заданной устойчивости). Поэтому традиционная задача поиска наилучших маршрутов не является главной целью рассматриваемой далее методики расчета маршрутов. В общем случае все маршруты (основные и резервные) между всеми КПУ СТУ и КПУ ИКС могут быть взяты из реальной сети или вычислены заранее известными методами и для рассматриваемой задачи оценки устойчивости заданы в виде исходных данных. И тогда рассматриваемая методика расчета маршрутов сведется лишь к преобразованию заданных маршрутов между каждой очередной анализируемой КПУ в специальный формат упомянутой выше матрицы $Me = \{Me_{l,k}\}$ списка сетевых элементов $k = 1, \dots, K$, входящих во все маршруты $l = 1, \dots, L$, доступные для данной КПУ.

Формат данных в матрице Me выбран таким образом, чтобы упростить расчет устойчивости направлений связи по формуле (3) с нераскрытыми в пер-

воисточнике [17] математическими действиями, обозначенными символом E , необходимыми для учета эффекта поглощения.

Стоит заметить, что в данном разделе в рассматриваемой частной методике расчета маршрутов указанные математические действия также не раскрываются, а только подготавливаются исходные данные для них. Раскрываются эти действия, соответствующие учету эффекта поглощения, в следующем разделе при рассмотрении частной методики расчета частных показателей структурной и функциональной устойчивости, в которой важное место занимает заранее рассчитанная матрица Me выбранного формата.

При выборе формата матрицы Me учитывалось то, что согласно методу расчета устойчивости по методике, приведенной в [17], не нужно знать последовательность сетевых элементов в каждом маршруте, а достаточно знать, какие сетевые элементы входят в рассматриваемый маршрут, а какие нет. Признаком использования сетевого элемента $k=1, \dots, K$ в маршруте $l=1, \dots, L$ является условие $|Me_{l,k}| = 1$, а неиспользования – условие $Me_{l,k} = 0$. При этом если k -й элемент является ребром графа, то значение $Me_{l,k} = 1$ указывает на то, что данное ребро используется в прямом направлении (от соседнего узла, смежного с данным ребром, с меньшим номером к узлу с большим номером) в данном l -м маршруте, а значение $Me_{l,k} = -1$ указывает на то, что данное ребро используется в обратном направлении.

Если же доступные маршруты между КПУ не заданы, то они вычисляются согласно предлагаемой методике расчета маршрутов методом ветвей и границ с учетом заданных ограничений на суммарное количество сетевых элементов r_{max} и их суммарный вес v_{max} . Учет указанных ограничений, с одной стороны, позволяет учесть реальные ограничения, встречающиеся на практике, а с другой стороны, позволяет управлять соотношением времени и точности расчетов. В частности, если более высоким значениям весовых коэффициентов отдельных сетевых элементов соответствуют более низкие значения объектовой устойчивости, то задавая определенный порог v_{max} , можно существенно сократить время расчетов (за счет отбрасывания заведомо плохих по устойчивости маршрутов), не теряя необходимой точности.

Таким образом, в качестве частной методики расчета маршрутов между КПУ СТУ и КПУ ИКС СН предлагается использовать методику, представленную на рис. 4, основные функции блоков которой раскрыты ниже.

Блок 1. Подготовка исходных данных в виде матрицы соседства G_s , заданной КПУ X_i и X_j , вектора весовых коэффициентов $vN = \{vN_{k,1}, vN_{k,2}\}$, где $k = \overline{1, K}$, количества вершин в графе N_v , максимального допустимого количества сетевых элементов на маршрутах (вершин и ребер) r_{max} и максимального допустимого суммарного веса маршрутов v_{max} .

Блок 2. Начальные присвоения:

$L = 0$ – исходный номер текущего маршрута (он же – текущее количество маршрутов),

$r_k = 0, k = \overline{1, K}$, – очередной номер по порядку соседа k -го по порядку элемента текущего маршрута,

$Ph_k = 0, k = \overline{1, K}$, – сетевой номер очередного k -го по порядку элемента текущего маршрута,
 $nx = 1$ – исходный номер по порядку элемента текущего маршрута,
 $Ph_1 = X_i$ – сетевой номер первого по порядку элемента текущего маршрута,
 $vlast_1 = vN_{x,1}$, где $x = X_i$, – начальный вес последнего элемента (вначале это первый элемент) в текущем маршруте,
 $v_{sum} = vlast_1$ – начальный суммарный вес текущего маршрута.

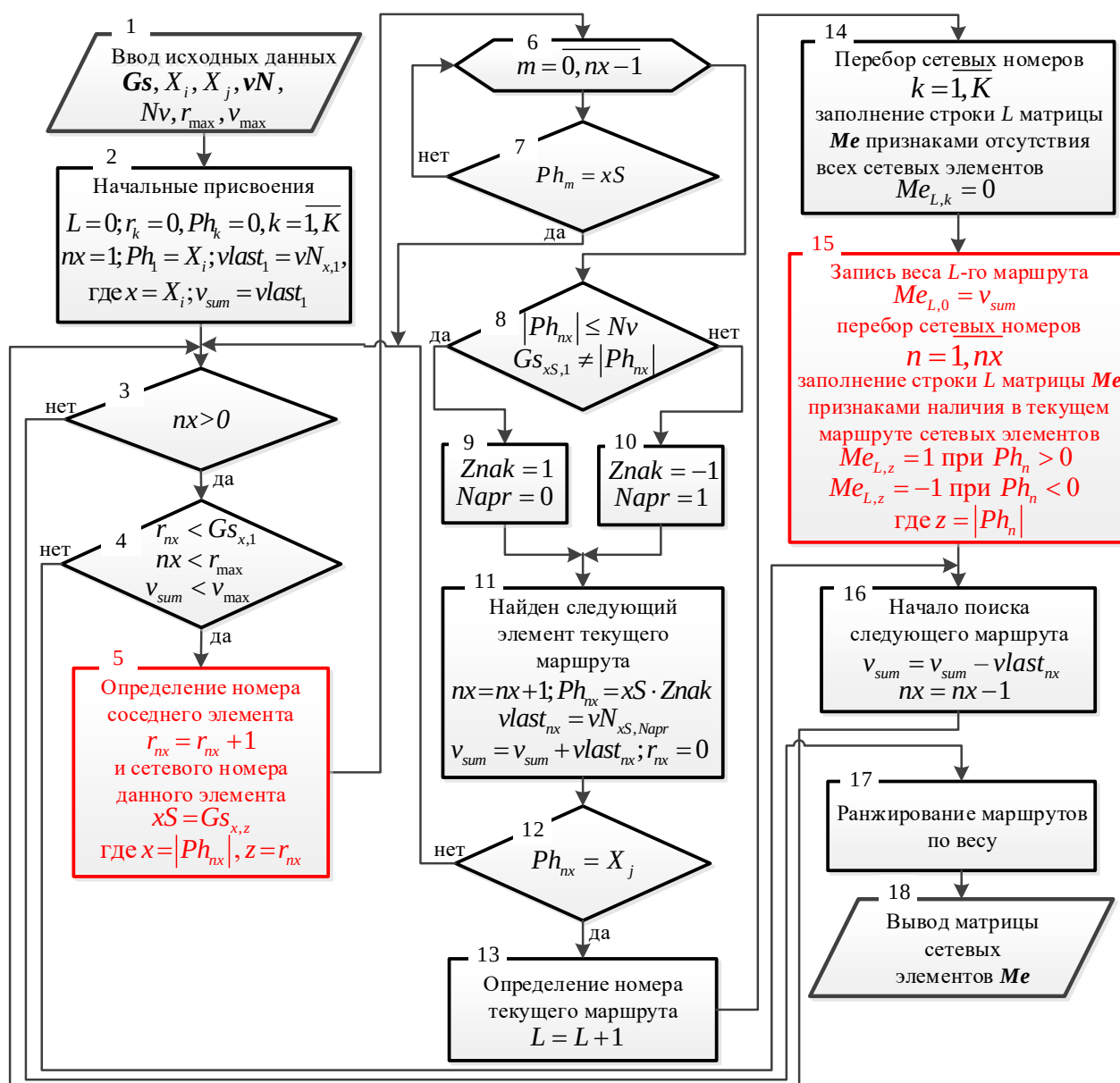


Рис. 4. Методика расчета маршрутов между КПУ ИКС СН и СТУ

Блок 3. Если $nx > 0$, то переход к следующему блоку 4. Иначе – переход к последнему блоку 17 (поиск маршрутов закончен).

Блок 4. Если $rx < Gsx,1$ (еще есть соседние элементы), где $x = Ph_{nx}$, а также число сетевых элементов на маршруте $nx < r_{max}$ и их суммарный вес $v_{sum} < v_{max}$ меньше допустимых значений, то переход к следующему блоку 5. Иначе (если

нарушено хотя бы одно из трех неравенств) – переход к блоку 16 (начало формирования нового маршрута с ответвления от текущего).

Блок 5. Определение следующего по порядку номера r_{nx} соседнего элемента у элемента маршрута с номером nx по порядку: $r_{nx} = r_{nx} + 1$, и сетевого номера данного элемента: $xS = Gs_{x,z}$, где $x = |Ph_{nx}|$, $z = r_{nx}$.

Блок 6. Цикл перебора предыдущих элементов текущего маршрута (для исключения заикливания) $m = \overline{0, nx-1}$. После окончания перебора переход к блоку 8.

Блок 7. Если $Ph_m = xS$ (есть заикливание), то переход к блоку 3, иначе – переход к блоку 6 (продолжение цикла).

Блок 8. Проверка условия $|Ph_{nx}| \leq Nv$, что предыдущий элемент был вершиной, и условия $Gs_{xS,1} \neq |Ph_{nx}|$, что текущее ребро имеет обратный знак относительно матрицы соседей. В случае положительного исхода проверки выполняется переход к блоку 9, в котором устанавливается положительный знак $Znak = 1$ и индекс направления $Napr = 0$, иначе – переход к блоку 10, в котором устанавливается отрицательный знак $Znak = -1$ и индекс направления $Napr = 1$. Затем в обоих случаях выполняется переход к блоку 11.

Блок 11. Найден следующий элемент текущего маршрута. Определение его номера по порядку на маршруте $nx = nx + 1$ и его сетевого номера (с учетом знака) $Ph_{nx} = xS \cdot Znak$, запоминание веса последнего элемента $vlast_{nx} = vN_{xS, Napr}$, уточнение суммарного веса маршрута $v_{sum} = v_{sum} + vlast_{nx}$ и сброс номера по порядку очередного соседа $r_{nx} = 0$.

Блок 12. Если $Ph_{nx} = X_j$ (очередной сетевой элемент на маршруте последний), то переход к блоку 13, иначе – переход к блоку 3 (продолжение формирования маршрута).

Блок 13. Очередной маршрут найден. Уточнение количества найденных маршрутов (номер последнего маршрута) $L = L + 1$.

Блок 14. Перебор сетевых номеров $k = \overline{1, K}$ и предварительное заполнение очередной строки L матрицы **Me** признаками отсутствия в текущем маршруте всех сетевых элементов: $Me_{L,k} = 0$.

Блок 15. Запись в 0-й элемент L -й строки веса найденного маршрута $Me_{L,0} = v_{sum}$ и перебор номеров по порядку $n = \overline{1, nx}$ элементов текущего маршрута L с заполнением очередной строки L матрицы **Me** признаками наличия в текущем маршруте сетевых элементов: $Me_{L,z} = 1$ (признак использования элемента z в прямом направлении) при $Ph_n > 0$ или $Me_{L,z} = -1$ (признак использования элемента z в обратном направлении) при $Ph_n < 0$, где $z = |Ph_n|$.

Блок 16. Начало поиска следующего маршрута (продолжая предыдущий с ответвления от предпоследнего элемента). Уменьшение суммарного веса $v_{sum} = v_{sum} - vlast_{nx}$ на величину веса последнего элемента nx и уточнение нового последнего номера по порядку, с которого будет продолжен поиск элементов следующего маршрута $nx = nx - 1$. Затем – переход к блоку 3.

Блок 17. Ранжирование всех найденных маршрутов по суммарному весу, записанному в 0-й колонке матрицы **Me**.

Блок 18. Матрица сетевых элементов **Me**, входящих в разные маршруты между заданной КПУ X_i и X_j сформирована. Вывод результатов.

Красным цветом на рис. 4 выделены блоки 5 и 15, в которых сосредоточены наиболее существенные отличительные признаки разработанной методики расчета маршрутов, связанные с использованием особых (имеющих особый формат) матриц **Gs** соседей и матриц **Me** сетевых элементов, входящих в отобранные маршруты.

В качестве примера использования разработанной методики расчета маршрутов в таблице 11 приведены результаты расчета матрицы **Me** сетевых элементов, входящих в найденные четыре маршрута между КПУ X_1 и X_2 .

Таблица 11 – Пример рассчитанной матрицы сетевых элементов **Me**, входящих в найденные маршруты между КПУ X_1 и X_2

Маршрут	Вес	Вершины						Ребра									
№		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
1	4	1	1	1	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0
2	5	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	8	1	1	1	1	1	0	0	0	1	-1	0	-1	0	1	0	0
4	12	1	1	1	1	1	1	0	0	1	-1	0	-1	0	0	1	-1

Для наглядности в таблице 11 признаки сетевых элементов, входящих в отдельные маршруты (отмечены числами 1 и -1) выделены цветом: крайние вершины – зеленым, промежуточные вершины – голубым, ребра – желтым. Согласно описанному ранее формату матрицы **Me**, число 1 является признаком использования вершин и ребер, направленных от вершин с меньшим номером к вершинам с большим номером, а число -1 является признаком использования ребер, направленных от вершин с большим номером к вершинам с меньшим номером.

Так как в настоящей статье для примера был использован исходный граф сети (рис. 2а) такой же, как в статье [18], и выбрано совпадающее направление связи между КПУ X_1 и X_2 (только в статье [18] вместо букв X для обозначения вершин используются буквы U), то можно сравнить результаты расчета маршрутов в [18] и в настоящей статье, найденные разными способами.

В [18] найденные маршруты обозначены в виде цепочек вершин: кратчайший маршрут $X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$ с суммарным весом 4 и три резервных маршрута $X_1 \rightarrow X_2$, $X_1 \rightarrow X_4 \rightarrow X_5 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$ и $X_1 \rightarrow X_4 \rightarrow X_6 \rightarrow X_5 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$, с суммарными весами 5, 8 и 12, соответственно. Сравнивая номера вершин, входящих в данные цепочки, и отмеченные числами 1 в таблице 11 колонки, соответствующие вершинам, входящим в разные маршруты, видно, что они полностью совпадают. Полностью совпадают также веса найденных маршрутов. Отличие результатов расчета маршрутов только в том, что таблица 11 не отражает очередности вершин в найденных маршрутах, но это для расчета устойчивости, как уже отмечалось ранее, и не нужно.

3. Частная методика расчета частных показателей структурной и функциональной устойчивости технологических и информационных направлений связи между КПУ СТУ и между КПУ ИКС СН

Разработка частной методики расчета частных показателей структурной и функциональной устойчивости информационных и служебных направлений связи между КПУ СТУ и КПУ ИКС СН является третьей частной задачей, решаемой в настоящей работе, в соответствии с общей постановкой задачи сформулированной в начале статьи.

Под частными показателями структурной и функциональной устойчивости отдельных направлений связи между КПУ X_i и X_j , $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, N$, в настоящей работе понимаются показатели условно только структурной устойчивости $P=\{p_{ij}\}$ данных направлений, рассчитываемые по формуле (3), но с учетом только тех маршрутов, пропускной способности которых достаточно для нормального функционирования всех направлений, упорядоченных в порядке убывания важности $r=1, \dots, r_{max}$. Соответствие между одиночными r и парными (i, j) номерами КПУ (индексами в обозначениях $\{p_r\}$ и $\{p_{ij}\}$) устанавливается описанными в графо-матричной модели векторами **RTS** и **RIS** для технологических и информационных направлений, соответственно.

Для отслеживания расхода ресурса пропускной способности $cN=\{cN_{k,1}, cN_{k,2}\}$, всех сетевых элементов $\{X_k\}$, $k=1, \dots, K$, на обслуживание уже учтенных направлений связи при их последовательном переборе в порядке убывания важности (т. е. в порядке следования индексов $r=1, \dots, r_{max}$) используется вспомогательный парный вектор $Z=\{Z_{k,1}, Z_{k,2}\}$ текущей загрузки (в единицах пропускной способности) сетевых элементов $\{X_k\}$, $k=1, \dots, K$ (для ребер – в обоих направлениях), корректируемый после расчета устойчивости каждого очередного направления связи r между КПУ X_i и X_j в сторону увеличения на величину заданного потока данных λ_{ij} , считываемого из матриц **GTλ** или **GIλ**, для технологических и информационных направлений связи, соответственно.

В общем случае при расчете функциональной устойчивости отдельных направлений связи довольно сложно учесть все многообразие современных технологий динамического распределения пропускной способности основных и резервных маршрутов при обслуживании мультисервисного трафика в виде различных виртуальных каналов. В настоящей работе предлагается использовать граничные оценки последствий распределения пропускной способности, отличающиеся двумя крайними вариантами её резервирования:

– верхняя оценка (завышающая совместную структурную и функциональную устойчивость) при резервировании пропускной способности сетевых элементов, входящих только в основной маршрут (менее приоритетные потоки данных могут использовать пропускную способность сетевых элементов, выделенную для резервирования более приоритетных потоков на вторичной основе, т. е. когда более приоритетным потокам хватает их основных маршрутов и резервные маршруты ими не используются);

– нижняя оценка (занижающая совместную структурную и функциональную устойчивость) при резервировании пропускной способности сетевых элементов, входящих как в основной, так и во все резервные маршруты (менее приоритетные потоки данных не могут использовать пропускную способность сетевых элементов, выделенную для резервирования более приоритетных потоков независимо от их текущего использования).

Таким образом, сущность рассматриваемой далее методики заключается в оценке частных показателей устойчивости отдельных направлений связи, перебираемых в порядке убывания важности. При этом расчет структурной устойчивости каждого очередного направления связи выполняется с учетом уже выделенных (занятых) ресурсов пропускной способности для более важных направлений, что ограничивает множество доступных маршрутов вплоть до их полного отсутствия для менее важных. На практике это приводит к потере части трафика за счет его отбрасывания на граничных маршрутизаторах. В методике учет этого отбрасывания части трафика низкого приоритета при недостатке пропускной способности элементов в доступных маршрутах приводит к снижению значения рассчитываемого частного показателя устойчивости.

С учетом вышесказанного рассчитываемый частный показатель устойчивости фактически отражает не только структурную устойчивость, но и функциональную, так как зависит от пропускной способности и «чувствует» её недостаточность как для основного, так и для резервных маршрутов.

Следует отметить, что в данной работе в явном виде не учитываются временные потери на переключения маршрутов при резервировании, что рассматривается, например, в [2, 4–8]. Основное внимание в предлагаемой методике уделяется учету потерь функциональной устойчивости из-за расхода ресурсов ПС на СТУ и статистических временных потерь в виде снижения вероятности связности из-за меньшего числа доступных маршрутов между КПУ ИКС СН с необходимой ПС и из-за неидеальной устойчивости направлений передачи технологической информации СТУ ко всем сетевым элементам на этих маршрутах, что косвенно может отражать и усредненные временные потери на переключение маршрутов.

В результате исследования алгебраических преобразований, соответствующих вычислениям по формуле (3), отражающей общий смысл учета эффекта поглощения, было получено следующее эквивалентное математическое выражение, позволяющее рассчитывать вероятность связности для каждой КПУ r на основании сформированного вектора коэффициентов готовности pN и рассчитанной матрицы сетевых элементов Me , входящих в разные маршруты между этими КПУ:

$$p_r = E \left\{ p_r^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_r^{(l)} \in \mu_r} (1 - p_r^{(l)}) \right\} = \sum_{m=1}^{M_r} \sum_{i=1}^{C_{M_r}^m} (-1)^{m-1} \prod_{k=1}^K pN_k^{Is_{L_i^m}^k}, \quad (5)$$

где

$$Is_{L_i^m}^k = 1 - \prod_{j=1}^m \left(1 - |Me_{L_{i,j}^m, k}| \right). \quad (6)$$

Перечню всех цепей μ_r в левой части выражения (5), полученной из (3) путем замены парных индексов i, j на одиночные r , соответствует множество всех маршрутов в матрице $\mathbf{Me}$ в количестве M_r .

Правая часть математического выражения (5) отражает перебор слагаемых, представляющих собой условную совместную вероятность исправного состояния $k = \overline{1, K}$ сетевых элементов, образующих маршруты, входящие в каждое из возможных сочетаний из M_r маршрутов по m маршрутов $i = \overline{1, C_{M_r}^m}$, $m = \overline{1, M_r}$, рассчитываемую с учетом эффекта поглощения, достигаемого путем предварительного расчета показателей степени $IS_{L_i^m}^k$ по формуле (6), которые представляют собой логические признаки наличия сетевого элемента k (1, если есть этот элемент и 0, если нет) хотя бы в одном маршруте из множества L_i^m , соответствующего i -му сочетанию m маршрутов из числа всех маршрутов M_r , что обеспечивает исключение события многократного учета коэффициента готовности одного ребра или одной вершины.

Нетрудно видеть, что количество всех слагаемых, определяемое двумя знаками суммы в формуле (5), равно $2^{M_r} - 1$. При этом очередность перебора слагаемых не обязательно должна соответствовать последовательному возрастанию индексов $i = \overline{1, C_{M_r}^m}$, $m = \overline{1, M_r}$ (от перестановки мест слагаемых сумма не меняется). Это позволяет использовать для вычислений по формуле (5) любой способ полного перебора всех слагаемых (в любой последовательности), удобный для программной реализации.

Коэффициенты готовности отдельных сетевых элементов pN_k для расчета по формуле (5) берутся из парного вектора $\mathbf{pN} = \{pN_{k,1}, pN_{k,2}\}$ с учетом направления (1 или 2), в котором они используются в учитываемых маршрутах. В некоторых случаях может возникнуть ситуация, когда в одно сочетание попадут маршруты с одним и тем же сетевым элементом (ребром), используемым в разных направлениях. В такой ситуации для учета эффекта поглощения коэффициент готовности данного элемента должен вычисляться как некоторая свертка двух встречных коэффициентов. В простейшем случае это может быть произведение, если отказы во встречных направлениях независимые, или минимальное из двух значений, если отказы зависимые.

Таким образом, в качестве частной методики расчета частных показателей $\{p_r\}$ структурной и функциональной устойчивости информационных и служебных направлений связи $r = 1, \dots, r_{\max}$ между КПУ СТУ и КПУ ИКС СН, предлагается использовать методику, представленную на рис. 5.

На данном рисунке используются обозначения элементов многомерных массивов $IS_{L_i^m}^k$ и $L_{i,j}^m$ такие же, как в формуле (5), но в предлагаемой программной реализации они являются элементами одномерных массивов, у которых изменяемым индексом (указателем на элемент массива) является только верхний индекс k в массиве $IS_{L_i^m} = \{IS_{L_i^m}^k\}$ и нижний индекс j и в массиве $L_i^m = \{L_{i,j}^m\}$.

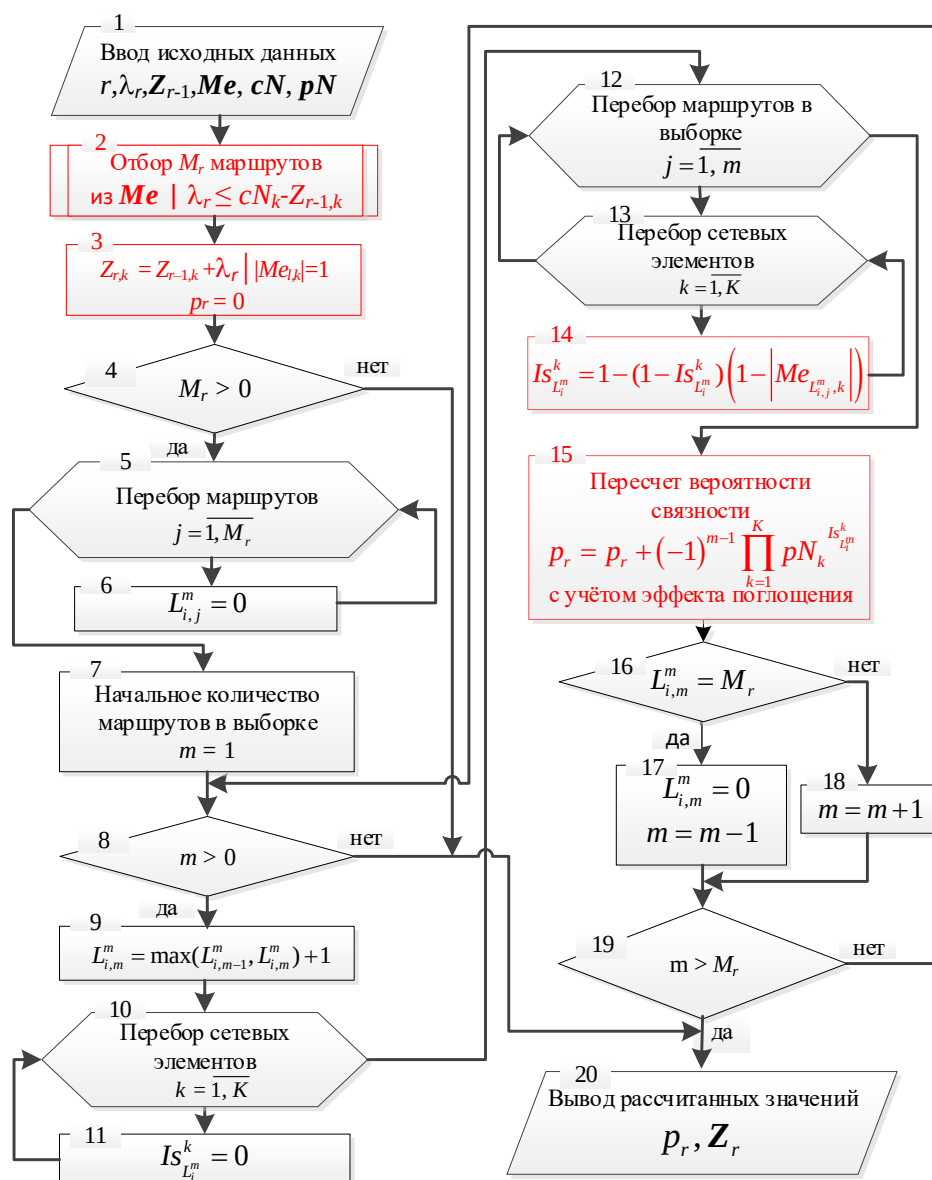


Рис. 5. Методика расчета частных показателей устойчивости направлений связи ИКС СН и СТУ

Далее описаны основные функции блоков методики, приведенной на рис. 5. Красным цветом выделены блоки, в которых сосредоточены наиболее существенные отличительные признаки разработанной методики.

Блок 1. Ввод (подготовка) исходных данных в виде номера очередного направления связи r , требуемой пропускной способности λ_r для направления r , вектора текущей загрузки Z_{r-1} всех сетевых элементов $\{X_k\}$, $k=1, \dots, K$, перед расчетом показателя устойчивости p_r (после выделения необходимой пропускной способности для предыдущих направлений связи с номерами $1, \dots, r-1$), матрицы сетевых элементов Me , входящих в найденные маршруты в направлении r , векторов пропускных способностей cN и коэффициентов готовности pN всех сетевых элементов $k=1, \dots, K$.

Блок 2. Отбор M_r маршрутов, входящих в матрицу Me , для элементов которых с номерами $k \in [1, K]$ выполняется условие достаточности остатка про-

пускной способности $cN_k - Z_{r-1,k}$ для обслуживания потока с требуемой пропускной способностью λ_r .

Блок 3. Пересчет загрузки $Z_{r,k} = Z_{r-1,k} + \lambda_r$ всех элементов $k \in [1, K]$, входящих в отобранные M_r маршрутов, в соответствии с выбранным вариантом граничной оценки последствий резервирования ресурсов (см. выше) – только для основных маршрутов или еще и для резервных. В этом же блоке выполняется начальное присвоение нулевого значения частному показателю устойчивости p_r .

Блок 4. Если $M_r > 0$ (есть отобранные маршруты с достаточной пропускной способностью), то переход к следующему блоку 5. Иначе – переход к блоку 20 (завершение расчетов с результатом $p_r = 0$ и с не изменившейся загрузкой Z_r).

Блок 5. Цикл перебора номеров маршрутов в выборке $j = \overline{0, M_r}$. После окончания цикла переход к блоку 7.

Блок 6. Задание исходного функционального соответствия номера маршрута j в выборке L_i^m номеру маршрута в матрице Me (0 – признак отсутствия маршрута в выборке L_i^m под номером j). Переход к блоку 5 (продолжение цикла по j).

Блок 7. Задание начального количества маршрутов в выборке $m=1$.

Блок 8. Если $m > 0$, то переход к блоку 9, иначе переход к блоку 20 (конец расчетов).

Блок 9. Задание функционального соответствия номера маршрута m в выборке L_i^m номеру маршрута в матрице Me (приведенная в блоке 9 формула вместе с операциями в блоках 16, 18 и 19 обеспечивает полный перебор в определенном порядке – см. пример далее).

Блок 10. Цикл перебора номеров сетевых элементов $k = \overline{1, K}$ (цикл формирования массива исходных признаков поглощения или не использования отдельных элементов). После окончания цикла переход к блоку 12.

Блок 11. Присвоение $Is_{L_i^m}^k = 0$ (исходное значение 0 – признак неиспользования элемента k в текущей выборке маршрутов L_i^m). Переход к блоку 10 (продолжение цикла по k).

Блок 12. Цикл перебора номеров маршрутов в выборке $j = \overline{1, m}$. После окончания цикла переход к блоку 15.

Блок 13. Цикл перебора номеров сетевых элементов $k = \overline{1, K}$. После окончания цикла переход к блоку 12.

Блок 14. Расчет признака $Is_{L_i^m}^k$ использования элемента k хотя бы в одном из маршрутов j текущей выборки L_i^m с (1 – используется, 0 – не используется) в соответствии с формулой (6).

Блок 15. Перерасчет вероятности связности p_r с учетом очередного слагаемого, соответствующего очередной выборке маршрутов, с учетом эффекта поглощения по формуле (5).

Блок 16. Если $L_{i,m}^m = M_r$ (максимальный номер маршрута в выборке L_i^m соответствует максимальному номеру/количеству маршрутов в матрице Me), то переход к блоку 17, иначе переход к блоку 18.

Блок 17. Обнуление/исключение маршрута с максимальным номером в выборке $L_{i,m}^m = 0$ и уменьшение количества маршрутов в выборке перед формированием новой выборки $m = m - 1$.

Блок 18. Увеличение количества маршрутов в выборке перед формированием новой выборки $m = m + 1$.

Блок 19. Если $m > M_r$, то переход к блоку 20 (окончание цикла расчетов для направления r), иначе переход к блоку 8 (продолжение расчетов с учетом очередной выборки маршрутов).

Блок 20. Вывод рассчитанных значений частных показателей функциональной и структурной устойчивости СТУ ИКС СН p_r и итогового массива загрузки сетевых элементов Z_r .

В таблице 12 приведен пример расчета вероятности связности КПУ X_1 и X_2 методом поглощения с демонстрацией промежуточных результатов расчета слагаемых по формуле (5) в соответствии с методикой на рис. 5. Для упрощения полагались доступными только первые три маршрута из четырех, приведенных в таблице 11.

Таблица 12 – Пример расчета вероятности связности КПУ методом поглощения

$l = \overline{1, M_r}$	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	0	0	0	1	-1	0	-1	0	1	0	0
pN_k	1,0	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
$m=1, C_{M_r}^m = 3, i=1, L_i^m = \{1\}, L_{i,1}^m = 1 \quad (-1)^{m-1} \prod_{k=1}^K pN_k^{Is_{L_i^m}^k} = 0,80838$																
$Is_{L_i^m}^k$	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
$pN_k^{Is_{L_i^m}^k}$	1,0	0,999	0,999	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$m=2, C_{M_r}^m = 3, i=1, L_i^m = \{1, 2\}, L_{i,1}^m = 1, L_{i,2}^m = 2 \quad (-1)^{m-1} \prod_{k=1}^K pN_k^{Is_{L_i^m}^k} = -0,72754$																
$Is_{L_i^m}^k$	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
$pN_k^{Is_{L_i^m}^k}$	1,0	0,999	0,999	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$m=3, C_{M_r}^m = 1, i=1, L_i^m = \{1, 2, 3\}, L_{i,1}^m = 1, L_{i,2}^m = 2, L_{i,3}^m = 3 \quad (-1)^{m-1} \prod_{k=1}^K pN_k^{Is_{L_i^m}^k} = +0,58813$																
$Is_{L_i^m}^k$	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0
$pN_k^{Is_{L_i^m}^k}$	1,0	0,999	0,999	0,999	0,999	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0
$m=2, C_{M_r}^m = 3, i=2, L_i^m = \{1, 3\}, L_{i,1}^m = 1, L_{i,2}^m = 3 \quad (-1)^{m-1} \prod_{k=1}^K pN_k^{Is_{L_i^m}^k} = -0,58813$																
$Is_{L_i^m}^k$	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0

$pN_k^{Is_{L_i^m}^k}$	1,0	0,999	0,999	0,999	0,999	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0
$m=1, C_{M_r}^m = 3, i=2, L_i^m = \{2\}, L_{i,1}^m = 2$ $(-1)^{m-1} \prod_{k=1}^K pN_k^{Is_{L_i^m}^k} = +0,89910$																
$Is_{L_i^m}^k$	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$pN_k^{Is_{L_i^m}^k}$	1,0	0,999	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$m=2, C_{M_r}^m = 3, i=3, L_i^m = \{2,3\}, L_{i,1}^m = 2, L_{i,2}^m = 3$ $(-1)^{m-1} \prod_{k=1}^K pN_k^{Is_{L_i^m}^k} = -0,58813$																
$Is_{L_i^m}^k$	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0
$pN_k^{Is_{L_i^m}^k}$	1,0	0,999	0,999	0,999	0,999	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0
$m=1, C_{M_r}^m = 3, i=3, L_i^m = \{3\}, L_{i,1}^m = 3$ $(-1)^{m-1} \prod_{k=1}^K pN_k^{Is_{L_i^m}^k} = +0,65348$																
$Is_{L_i^m}^k$	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0
$pN_k^{Is_{L_i^m}^k}$	1,0	0,999	0,999	0,999	0,999	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0

Итоговое значение вероятности связности p_r , являющейся в данном случае частным показателем структурной и функциональной устойчивости направления связи между КПУ X_1 и X_2 при $r=1$, равно сумме семи слагаемых, приведенных в таблице 12 в конце широких строчек (с учетом знаков +/-), и в численном выражении равно $p_r = p_{1,2} = 0,98647$.

4. Частная методика расчета обобщенных показателей структурной и функциональной устойчивости ИКС СН и СТУ

Разработка частной методики расчета обобщенных показателей структурной и функциональной устойчивости СТУ и ИКС СН является четвертой частной задачей, решаемой в настоящей работе, в соответствии с общей постановкой задачи сформулированной в начале статьи.

Согласно обобщенной методике, приведенной на рис. 1, в качестве обобщенных показателей структурной и функциональной устойчивости последовательно рассчитываются (для сравнения) сначала соответствующий показатель устойчивости $Q_{СТУ}$ автономной СТУ (блок 9 на рис. 1) без учета взаимодействия с ИКС СН, затем аналогичный показатель устойчивости ИКС СН $Q_{ИКС}$ без учета его зависимости от устойчивости СТУ (блок 17 на рис. 1), но с учетом отбора ресурсов ПС для СТУ, и наконец итоговый обобщенный показатель устойчивости СТУ ИКС СН $Q_{СТУ ИКС}$, представляющий собой обобщенный показатель устойчивости ИКС с учетом его зависимости от устойчивости технологических направлений связи СТУ (блок 18 на рис. 1). Методика позволяет рассчитать также (для сравнения) автономную устойчивость ИКС СН $Q'_{ИКС}$, как это обычно делается, без учета СТУ (для этого достаточно задать технологические потоки равные нулю).

Указанные выше обобщенные показатели структурной и функциональной устойчивости предлагается рассчитывать в виде взвешенной суммы вероятно-

стей связности $\{p_r\}$ всех учитываемых направлений связи $r=1, \dots, r_{\max}$, задавая в качестве весов относительные доли трафика в каждом направлении. Однако в отличие от подобной традиционной линейной свертки предлагаемый вариант свертки является нелинейным, поскольку «сворачиваемые» частные показатели устойчивости каждого очередного направления r зависят от уже учтенного трафика в предыдущих направлениях $1, \dots, r-1$. При этом за счет ранжирования перебираемых направлений в порядке убывания их важности учитывается приоритет более важных направлений при распределении ресурсов пропускной способности сетевых элементов, задействованных в рассчитанных (или заданных) основных и резервных маршрутах.

На основании вышесказанного расчет отмеченных выше обобщенных показателей структурной и функциональной устойчивости можно представить в виде следующих формул:

$$Q_{CTY} = \frac{1}{\Lambda_T} \sum_{rt=1}^{rt_{\max}} \lambda_{rt} \cdot p_{rt}(\{\lambda_l\}_{rt-1}), \quad (8)$$

где rt – очередной номер КПУ СТУ (в порядке убывания важности); Λ_T – суммарный трафик СТУ; $\{\lambda_l\}_{rt-1} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{rt-1}\}$ – уже учтенный трафик при расчете вероятностей связности технологических направлений связи между КПУ СТУ $1, \dots, rt-1$.

$$Q_{ИКС} = \frac{1}{\Lambda_I} \sum_{ri=rt+1}^{rt_{\max}+ri_{\max}} \lambda_{ri} \cdot p_{ri}(\{\lambda_l\}_{ri-1}), \quad (9)$$

где ri – очередной номер КПУ ИКС СН (в порядке убывания важности); Λ_I – суммарный трафик ИКС СН; $\{\lambda_l\}_{ri-1} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{ri-1}\}$ – уже учтенный трафик при расчете вероятностей связности технологических направлений связи между КПУ СТУ и КПУ ИКС СН $1, \dots, ri-1$.

На основании обобщенных показателей устойчивости, рассчитанных по формулам (8) и (9), расчет итогового обобщенного показателя $Q_{CTY_{ИКС}}$, можно выполнить просто путем перемножения обобщенных показателей устойчивости СТУ и ИКС СН:

$$Q_{CTY_{ИКС}} = Q_{CTY} \cdot Q_{ИКС}. \quad (10)$$

Однако итоговая устойчивость каждого элемента ИКС СН по-разному зависит от устойчивости технологического направления связи с НС (ЦС) своей группы и от устойчивости связи своей НС с ЦС. Следовательно, для более точного расчета итогового обобщенного показателя устойчивости $Q_{CTY_{ИКС}}$ необходимо сначала пересчитать коэффициенты готовности всех сетевых элементов с учетом рассчитанных частных показателей устойчивости технологических направлений связи соответствующих ОС с НС и ЦС СТУ.

Для функционирования замкнутых контуров СТУ технологические направления связи между ЦС и НС или НС и ОС должны быть исправными в обоих встречных направлениях. Следовательно, под вероятностью связности технологических направлений связи следует полагать вероятность исправного

состояния всех вершин и ребер хотя бы в одном маршруте в прямом и обратном направлениях. Однако, если во встречных направлениях во всех маршрутах используются одни и те же сетевые элементы, то общая вероятность связности будет определяться одним направлением, худшим по устойчивости (если устойчивость отдельных сетевых элементов будет разная в разных направлениях). Если же все элементы разные (с независимыми отказами), то итоговая устойчивость будет равна произведению вероятностей связности в одном и другом направлении. Наиболее сложным для точного расчета является промежуточный вариант, когда одна часть сетевых элементов является общей для встречных маршрутов, а другая часть входит только в маршруты одного направления. В такой ситуации следует учитывать эффект поглощения, но формула (5), полученная на основе формулы (3), для этой цели потребует доработки поскольку в представленном виде она позволяет учесть данный эффект для общих сетевых элементов в разных маршрутах только в одном направлении (включенных параллельно), а не во встречных (включенных последовательно).

В предлагаемой методике предлагается упрощенный расчет устойчивости замкнутых контуров СТУ в виде следующих двух граничных оценок, отмеченных выше:

- верхняя оценка устойчивости, которая предполагает полную корреляцию отказов встречных направлений (общая устойчивость вычисляется как меньшее значение из двух показателей устойчивости встречных направлений);
- нижняя оценка устойчивости, которая предполагает независимость отказов встречных направлений (общая устойчивость вычисляется как произведение показателей устойчивости встречных направлений).

Таким образом, более точный расчет итогового обобщенного показателя устойчивости $Q_{СТУ_{ИКС}}$ выполняется не по формуле (10), а по формуле (9), но после предварительного пересчета коэффициентов готовности тех сетевых элементов, устойчивость которых зависит от устойчивости технологических направлений связи СТУ.

В качестве примера далее представлены результаты расчета частных и обобщенных показателей структурной и функциональной устойчивости при исходных данных, описанных выше при рассмотрении графо-матричной модели СТУ ИКС СН, приведенной на рис. 3б.

Частные показатели устойчивости направлений связи между отдельными КПУ, используемые для расчета обобщенных показателей $Q_{СТУ}$, $Q_{ИКС}$ и $Q_{СТУ_{ИКС}}$ в виде нижней $Q'_{СТУ_{ИКС}}$ и верхней $Q''_{СТУ_{ИКС}}$ оценки представлены в таблицах 13, 14 и 15, 16, соответственно.

Таблица 13 – Частные показатели устойчивости автономной СТУ

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	1	0,9865	0,9718	0,8991	0	0
X_2	0,8991	0	0	0	0	0
X_3	0,9799	0	0,999	0	0,9790	0,8982
X_4	0,9718	0	0	0	0	0
X_5	0	0	0,8982	0	0	0
X_6	0	0	0,8076	0	0	0

Таблица 14 – Частные показатели устойчивости ИКС СН
без учета влияния устойчивости СТУ

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	0	0,9865	0,8991	0	0	0
X_2	0	0	0	0	0,8992	0
X_3	0	0	0	0	0	0
X_4	0	0	0	0	0,8076	0,8982
X_5	0	0	0	0	0	0
X_6	0	0	0	0	0	0

Таблица 15 – Частные показатели устойчивости ИКС СН
с учетом влияния устойчивости СТУ (нижняя оценка)

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	0	0,8717	0,8579	0	0	0
X_2	0	0	0	0	0,6711	0
X_3	0	0	0	0	0	0
X_4	0	0	0	0	0,4122	0,5454
X_5	0	0	0	0	0	0
X_6	0	0	0	0	0	0

Таблица 16 – Частные показатели устойчивости ИКС СН
с учетом влияния устойчивости СТУ (верхняя оценка)

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	0	0,8845	0,8746	0	0	0
X_2	0	0	0	0	0,7070	0
X_3	0	0	0	0	0	0
X_4	0	0	0	0	0,4999	0,6357
X_5	0	0	0	0	0	0
X_6	0	0	0	0	0	0

Путем описанной выше свертки частных показателей устойчивости, представленных в таблицах 13, 14 и 15, 16, были получены следующие значения обобщенных показателей: $Q_{СТУ}=0,9492$, $Q_{ИКС}=0,2494$, $Q'_{СТУ_{ИКС}}=0,1866$, $Q''_{СТУ_{ИКС}}=0,2001$. Как и следовало ожидать, самое высокое значение обобщенного показателя устойчивости оказалось у СТУ без учета взаимодействия с ИКС СН $Q_{СТУ}=0,9492$, а самое низкое – у обобщенного показателя устойчивости ИКС СН с учетом влияния устойчивости СТУ (нижняя оценка $Q'_{СТУ_{ИКС}}=0,1866$). Следует отметить, что и нижняя, и верхняя оценки итогового

показателя оказались ниже, чем упрощенная оценка данного показателя, рассчитанная по формуле (10) $Q_{СТУ} \cdot Q_{ИКС} = 0,2367$, что является, видимо, следствием конкретной структуры сети с преобладающим влиянием более длинных и менее устойчивых технологических направлений связи СТУ.

Могут вызвать сомнение очень низкие значения обобщенных показателей устойчивости ИКС СН, как с учетом влияния устойчивости СТУ $Q'_{СТУ_{ИКС}} = 0,1866$, $Q''_{СТУ_{ИКС}} = 0,2001$, так и без учета – $Q_{ИКС} = 0,2494$, не смотря на достаточно высокие значения ($\geq 0,9$) коэффициентов готовности сетевых элементов (табл. 3). Однако это вполне объяснимо, так как данные обобщенные показатели отражают не только структурную устойчивость, но и функциональную, отражающую степень выполнения требований по качеству обслуживания заданных потоков данных. Очевидно, в данном случае решающим фактором, повлиявшим на низкие значения указанных обобщенных показателей, оказалась недостаточная пропускная способность доступных маршрутов. В этом можно убедиться, сравнив заданную пропускную способность и результаты расчета загрузки сетевых элементов сначала технологическим трафиком СТУ $Z_{СТУ}$, а затем суммарным технологическим и информационным трафиком СТУ и ИКС СН (табл. 17).

Таблица 17 – Загрузка сетевых элементов ИКС СН на двух этапах расчета

cN			Z _{СТУ}			Z _{СТУ+ИКС}		
k	cN _{k,1}	cN _{k,2}	k	Z _{k,1}	Z _{k,2}	k	Z _{k,1}	Z _{k,2}
1	20	20	1	8	8	1	16	16
2	20	20	2	3	3	2	11	11
3	20	20	3	10	10	3	18	18
4	20	20	4	4	4	4	16	16
5	20	20	5	6	6	5	18	18
6	20	20	6	3	3	6	11	11
7	10	2	7	1	2	7	5	2
8	10	2	8	2	2	8	10	2
9	10	2	9	3	1	9	7	1
10	0	10	10	0	2	10	0	6
11	10	0	11	0	0	11	4	0
12	2	10	12	1	5	12	1	9
13	2	0	13	2	0	13	2	0
14	10	0	14	3	0	14	7	0
15	10	0	15	0	0	15	8	0
16	0	10	16	0	2	16	0	6

Желтым цветом в таблице выделены значения загрузки очень близкие или равные пропускной способности отдельных сетевых элементов, что не позволило проложить маршруты через эти сетевые элементы для низко приоритетных потоков данных, требующих для своего обслуживания (табл. 7б) большей пропускной способности, чем осталось у данных сетевых элементов после выделения необходимой части ПС для более приоритетного трафика.

Следует отметить, что высокая степень загрузки сетевых элементов, повлекшая за собой неполное обслуживание всего заданного трафика, отчасти связана с предполагаемым в данном примере жестким резервированием пропускной способности резервных маршрутов для более приоритетного трафика. В случае использования (и, соответственно, учета) мягкого резервирования пропускной способности резервных маршрутов, что более характерно для современных технологий обслуживания пакетного мультисервисного трафика, результаты расчетов были бы более оптимистичными.

В целом приведенные выше результаты свидетельствуют о возможности использования разработанной методики для расчета частных и обобщенных показателей структурной и функциональной устойчивости при различных исходных данных с целью сравнения различных структур СТУ ИКС СН и выбора наилучшей структуры по предлагаемому обобщенному показателю устойчивости.

Выводы

Разработанная методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой учитывает использование общих сетевых ресурсов и влияние устойчивости системы технологического управления на структурную и функциональную устойчивость всей сети.

В качестве обобщенного показателя устойчивости функционирования системы технологического управления использовалась особая свертка частных показателей структурной и функциональной устойчивости отдельных технологических и информационных направлений связи, рассчитанных с учетом их относительной важности, влияющей на распределение сетевых ресурсов. Новизна работы заключается в отмеченном выше способе свертки частных показателей устойчивости, в соответствии с которым с помощью разработанной методики одновременно с оценкой устойчивости функционирования системы технологического управления выполняется обобщенная оценка устойчивости функционирования инфокоммуникационной сети в целом, что, с одной стороны, позволяет учитывать использование общих сетевых ресурсов, а с другой стороны, не позволяет считать функционирование системы технологического управления устойчивым, если при этом не будет устойчивым функционирование управляемой инфокоммуникационной сети.

Также, новым в составе предлагаемой методики является расчет частных показателей структурной устойчивости отдельных направлений с помощью предложенной процедуры обработки матриц сетевых элементов, входящих в основные и резервные маршруты, что позволило достаточно просто учесть их корреляцию в разработанной программе расчета структурной устойчивости сети связи методом поглощения [20].

Разработанная методика может быть использована при выборе структуры системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения, оптимальной по предлагаемому обобщенному показателю устойчивости функционирования.

Литература

1. Арсланов Х. А., Башкирцев А. С., Лихачев А. М. Автоматизированная система управления связью Вооруженных Сил Российской Федерации и приоритетные направления ее развития // Тематический сборник. Связь в Вооружённых силах Российской Федерации. – М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2016. – С. 17-20.
2. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4. С. 69-79.
3. Одоевский С. М., Калюка В. И. Адаптивно-игровое моделирование военных сетей беспроводного абонентского доступа. – СПб.: Издательство Политехн. университета, 2017. – 240 с.
4. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск: Поликом, 2010. – 389 с.
5. Войцеховский А. И. Методика оценки устойчивости функционирования сети связи // Информационные системы и технологии. 2010. №1/57 (584). С. 101-108.
6. Исаков Е. Е. Устойчивость военной связи в условиях информационного противоборства. – СПб.: Политехнический университет, 2009. – 400 с.
7. Дудник Б. Я. Надёжность и живучесть систем связи. – М.: Радио и связь, 1984. – 215 с.
8. Ушаков И. А. Курс теории надёжности. – М.: ДРОФА, 2007. – 240 с.
9. Коцыняк М. А., Лаута О. С., Нечепуренко А. П., Штеренберг И. Г. Методика оценки устойчивости информационно-телекоммуникационной сети в условиях информационного воздействия // Труды учебных заведений связи. 2016. № 4. С. 82-87 DOI: 10.15688/jvolsu10.2017.2.2.
10. Привалов А. А., Бекбаев Г. А. Оценка устойчивости телекоммуникационной сети железнодорожной станции на основе схемы функциональной целостности // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио (20–28 апреля 2017 г.). – СПб.: СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – С. 293-295.
11. Осадчий А. И., Коцыняк М. А., Лаута О. С., Дементьев В. Е., Васюков Д. Ю. Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях информационного противоборства. – СПб.: ЛО ЦНИИС, 2014. – 126 с.
12. Попков В. К., Блукке В. П., Дворкин А. Б. Модели анализа устойчивости и живучести информационных сетей // Проблемы информатики. 2009. № 4. С. 63-78.
13. Величко В. В., Попков Г. В., Попков В. К. Модели и методы повышения живучести современных систем связи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2014. – 270 с.

14. Блукке В. П., Ершов К. А., Попков В. К. Об одной концептуальной модели живучести глобальных информационных сетей // Материалы 9-й Международной конференции «Проблемы функционирования информационных сетей», 2006. – С. 43-47.
15. Егунов М. М. Шувалов В. П. Анализ структурной надежности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. № 1. С. 54-60.
16. Додонов А. Г., Ландэ Д. В. Живучесть информационных систем. – К.: Наукова думка, 2011. – 256 с.
17. ГОСТ Р 53111 – 2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. – М.: Стандартинформ, 2008. – 15 с.
18. Макаренко С. И. Метод обеспечения устойчивости телекоммуникационной сети за счет использования ее топологической избыточности // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 14-30. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10302.
19. Мизин И. А., Богатырев В. А., Кулешов А. П. Сети коммутации пакетов / под ред. В.С. Семенихина. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.
20. Одоевский С. М., Лебедев П. В. Расчет структурной устойчивости сети связи методом поглощения // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020666401 от 09.12.2020.

References

1. Arslanov K. A., Bashkirtsev A. S., Likhachev A. M. Avtomatizirovannaja sistema upravlenija svjazju Vooruzennux Sil Rossiskoj Federacii [Automated communication management system of the Armed Forces of the Russian Federation and priority directions of its development]. *Thematic collection Communication in the Armed forces of the Russian Federation*, Moscow, Company "Information Bridge, 2016, pp. 17-20 (in Russian).
2. Mikhailov R. L., Makarenko S. I. Estimating communication network stability under the conditions of destabilizing factors affecting it. *Radio engineering and telecommunications systems*, 2013, no. 4, pp. 69-79 (in Russian).
3. Odoevsky S. M., Kalyuka V. I. *Adaptivno-igrovoe modelirovanie voennux setei besprovodnogo abonentskogo dostupa* [Adaptive-game modeling of military networks of wireless subscriber access]. St. Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University, 2017. 240 p. (in Russian).
4. Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metodi rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovanija uzlovogo oborudovanija i strukturno-setevux parametrov setei svjazj sledujuchego pokolenija* [Models and methods for calculating the quality indicators of the functioning of node equipment and structural and network parameters of next-generation communication networks]. Krasnoyarsk, Polikom, 2010. 389 p. (in Russian).
5. Voitsekhovskiy A. I. Metodika ocenki ustoychivosti funkcionirovanija seti svjazj [Methodology for assessing the stability of the functioning of the communication network]. *Information systems and technologies*, 2010, no. 1/57(584), pp. 101-108 (in Russian).

6. Isakov E. E. *Ustoichivost voennoi svjazi v uslovijax informacionnogo protivoborstva* [Stability of military communications in the conditions of information confrontation]. St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2009. 400 p. (in Russian).

7. Dudnik B. Y. *Nadeznost i zivuchest setei svjazi* [Reliability and survivability of communication systems]. Moscow, Radio and Communication, 1984. 215 p. (in Russian).

8. Ushakov I. A. *Kurs teorii nadeznosti* [Course of reliability theory]. Moscow, Drofa, 2007. 240 p. (in Russian).

9. Kotsynyak M. A., Laut O.S., Nechepurenko A. P., Shterenberg I. G. Method of assessment of stability of the information and telecommunications network in the information exposure. *Trudi ychebnux zavedenij svjazi*, 2016, no. 4, pp. 82-87 (in Russian). DOI: 10.15688/jvolsu10.2017.2.2.

10. Privalov A. A., Bekbaev G. A. Ocenka ustoichivosti telekommunikacionnoi seti zeleznodoroznoi stancii na osnove cxemu funkcionalnoi celostnosti [Assessment of the stability of the telecommunications network of the railway station on the basis of the scheme of functional integrity]. *72-ja Vserossijskaja nauchno-texnicheskaja konferencija, posvjachennaja Dnu radio* [72-nd All-Russian Scientific and Technical Conference, dedicated to the Day of Radio]. St. Petersburg, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), 2017. pp. 293-295 (in Russian).

11. Osadchy A. I., Kotsynyak M. A., Laut A. C., Dementyev V. E., Vasyukov D.Y. *Obespechenie ystoichvosti informacionno-telekommynikacionnux setei v uslovijax informacionnogo protivoborstva* [Sustainability information and telecommunications networks in conditions of information warfare]. St. Petersburg, Leningrad Industrial Research Institute of Communication, 2014. 126 p. (in Russian).

12. Popkov V. K., Blucke V. P., Dvorkin A. B. Modeli analiza ustoichvosti I zivuchesti informacionnux system svjazi [Models of analysis of stability and survivability of information networks]. *Informatics problems*, 2009, no. 4, pp 63-78 (in Russian).

13. Velichko V. V., Popkov G. V., Popkov V. K. *Modeli i metodu povushenija zivuchesti sovremennux system svjazi* [Models and methods of increasing the survivability of modern communication systems]. Moscow, Hotline-Telecom, 2014. 270 p. (in Russian).

14. Blucke V. P., Yershov K. A., Popkov V. K. On one conceptual model of survivability of global information networks. *Materialu 9-i Mezhdunarodnoi konferencii "Problemu funkcionirovanija informacionnux setei"* [Materials of the 9-th International Conference "Problems of functioning of Information Networks"], 2006, pp. 43-47 (in Russian).

15. Yegunov M. M., Shuvalov V. P. Analiz strukturnoi nadeznosti transportnoi seti [Analysis of the structural reliability of the transport network]. *Vestnik of SibGUTI*, 2012, no. 1, pp. 54-60 (in Russian).

16. Dodonov A. G., Lande D. V. *Zivuchest informacionnux system* [Survivability of information systems]. Krasnoyarsk, Naukova dumka, 2011. 256 p. (in Russian).

17. State Standart 53111 – 2008. Stability of the functioning of the public communication network. Moscow, Standartinform, 2008. 15 p. (in Russian).
18. Makarenko S. I. Stability method of telecommunication network with using topological redundancy. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 14-30 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10302.
19. Mizin I. N., Bogaturev V. A., Kuleshov A. P. *Seti commutacii paketov* [Packet switching networks]. Edited by Semenihin B. S., Moscow, Radio and communication, 1986, 408 p. (in Russian).
20. Odоеvsky S. M., Lebedev P. V. *Raschet strukturnoi ustoichivosti seti svyazi metodom pogloscheniya. Svidetelstvo o registracii programu dlja EVM* [Calculation of the structural stability of the communication network by the absorption method. The certificate on Registration of the Computer Program]. No. 2020666401. 2020.

Статья поступила 27 февраля 2021 г.

Информация об авторах

Одоевский Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры сетей связи и систем коммутации. Военная академия связи. Область научных интересов: качество обслуживания, радиоэлектронная борьба, устойчивость сетей и систем связи к преднамеренным деструктивным воздействиям. E-mail: odse2017@mail.ru

Лебедев Павел Владимирович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации. Военная академия связи. Область научных интересов: качество обслуживания, устойчивость сетей и систем связи к преднамеренным деструктивным воздействиям. E-mail: spirit-angel@yandex.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Method for estimating the stability of a system of technological management for a special purpose infocommunication network with a defined topological and functional structures

S. M. Odоеvsky, P. V. Lebedev

Problem statement: The functioning of special-purpose information and communication networks occurs under the influence of many destabilizing factors, including those caused by the destructive influence of the enemy. The technological control system plays an important role in ensuring the stability of the operation of these networks under the influence of destabilizing factors, which implements the functions of remote monitoring and changing the technical condition of network elements, including the functions of detecting and reserving network elements that have failed. When choosing the structure of a technological management system, it is necessary to be able to assess the stability of its functioning with the selected parameters of its own structure, taking into account the impact on the stability of a managed information and communication network with a given topological and functional structure. The known methods of assessing the stability of communication networks are usually reduced to calculations of the structural stability of individual communication directions and do not allow us to assess the overall structural and functional stability of the technological control system and the managed network as a whole. **The aim** of this work is to develop a methodology for assessing the sustainability of management systems information and communication net-

work special purpose with a given topological and functional structure with the use of shared network resources and the influence of stability of process control systems on structural and functional stability of the entire network. **Methods used:** a graph-matrix model represented the system of technological management of a special-purpose infocommunication network. As a generalized indicator of the sustainability of process control systems used a special convolution of the partial indicators of the structural and functional stability of individual service and informational communications, based on their relative importance in influencing the distribution of network resources. **The novelty** of the work lies in the aforementioned method of convolution of partial indicators of sustainability, according to which with the help of this technique simultaneously with the evaluation of the sustainability of the system of technological control are generalized evaluation of the sustainability of infocommunication networks. That, on the one hand, allows considering the use of shared network resources, and on the other hand, does not allow considering the operation of process control systems sustainable, if at the same time the functioning of the managed information and communication network is not stable. In addition, new in the proposed method in the calculation of partial indicators of structural stability of individual directions using the proposed procedure for processing the matrices of network elements included in the main and backup routes, which makes it easy to take into account their correlation in the form of absorption of common elements. **Result:** a sequential procedure for calculating the partial stability indicators of individual communication directions, ranked by importance, as well as generalized stability indicators of the technological management system and the infocommunication network separately, as well as jointly (taking into account mutual influence), is described in detail. **Practical relevance:** the developed method used when selecting the structure of the process control systems information and communication network special purpose, optimal on the proposed generalized index of sustainability.

Keywords: functional and structural stability, methodology, technological management system, generalized indicator.

Information about Authors

Sergey Mikhailovich Odoevsky – Dr. habil. of Technical Sciences, Professor. Professor of the Department of Communication Networks and Switching Systems. Military Academy of Communications. Research interests: quality of service, electronic warfare, stability of network against the purposeful destabilizing factors. E-mail: odse2017@mail.ru

Pavel Vladimirovich Lebedev – Postgraduate student. The postgraduate student of the Department of Communication Networks and Switching Systems. Military Academy of Communications. Research interests: communication networks, quality of service, stability of network against the purposeful destabilizing factors. E-mail: spirit-angel@yandex.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3.