

Структурная оптимизация трубопроводных систем при их проектировании и реконструкции



Игорь ТАРАРЫЧКИН

Igor A. TARARYCHKIN

Structural Optimization of Pipeline Systems during their Design and Reconstruction

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 26)

Рассмотрены особенности структурной оптимизации систем трубопроводного транспорта, помогающей обеспечить требуемый уровень их стойкости к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов. Показано, что наивысший уровень стойкости сетевых структур к последовательно усиливающимся рискам повреждения достигается в системах с наибольшим составом подмножества G1, при условии высокой валентности узла-источника целевого продукта. Под валентностью отдельного узла системы понимается количество сходящихся в него трубопроводов, а линейные элементы, соединяющие напрямую источник и потребителей продукта, рассматриваются как принадлежащие подмножеству G1. Установленные закономерности позволяют решать задачи поиска оптимальных сетевых структур, стойких к развитию аварийных ситуаций, по механизму прогрессирующей блокировки узлов при проектировании и реконструкции систем трубопроводного транспорта.

Ключевые слова: транспорт, система, трубопровод, структура, оптимизация, повреждение.

Тарарычкин Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор, Луганск, Украина.

Системы трубопроводного транспорта широко используют в различных отраслях промышленного производства при доставке потребителям различных веществ и материалов [1, 2]. Технологические возможности таких систем в значительной степени зависят от их структуры, выбор которой представляет собой самостоятельную инженерно-техническую задачу.

Принимаемые проектные решения определяют не только эксплуатационные свойства систем, но и их поведение в условиях развития внештатных ситуаций. Так, переход в состояние неработоспособности одного или нескольких трубопроводов может привести к ограничениям или полному прекращению доставки целевого продукта отдельным потребителям. В этих условиях наибольшую опасность представляет процесс повреждения узловых элементов системы, при котором доставка продукта через заблокированный узел становится невозможной.

По существу, блокировка узла означает одномоментный переход в состояние неработоспособности всех трубопроводов, сходящихся в данный узел. Если процесс блокировки протекает в случайной после-

довательности, то такой сценарий развития аварийной ситуации называется прогрессирующей блокировкой [3].

Прогрессирующее повреждение по механизму блокировки транспортных узлов является чрезвычайно опасным вариантом развития событий, при котором происходит быстрая деградация свойств системы с последующим отключением от источника всех потребителей продукта. Способность системы противостоять развитию процессов прогрессирующей блокировки характеризуется показателем стойкости F_x . Он представляет собой среднюю долю узлов, чья блокировка в случайной последовательности приводит к отключению от источника всех потребителей целевого продукта.

Значение $0 \leq F_x \leq 1$ зависит от структуры трубопроводной системы и устанавливается при помощи метода имитационного моделирования [3]. Чем ближе значение показателя стойкости к единице, тем большей стойкостью к прогрессирующей блокировке узлов характеризуется структура трубопроводной системы.

Структурный синтез трубопроводных систем следует выполнять с позиций оптимальности, т.е. поиска наилучшего или близкого к нему решения из имеющегося набора альтернатив [6].

Рассмотрим в этой связи наиболее распространённые варианты постановки типовых задач проектирования и соответствующие методы их решения.

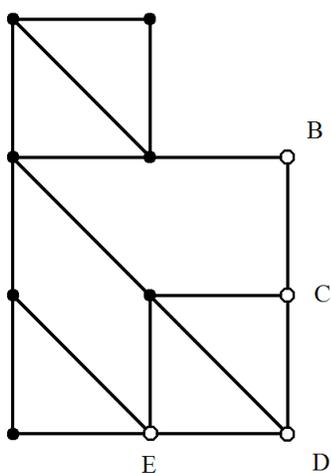
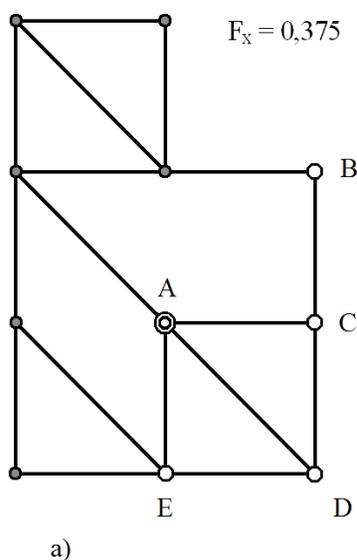


Рис. 1. Сетевой объект с заданным расположением узлов-потребителей целевого продукта.

Постановка задачи. Для заданной сетевой структуры с известным расположением узлов-потребителей целевого продукта требуется выбрать положение узла-источника. Синтезированный объект должен быть по возможности близким к оптимальному, обеспечивая наивысший (или близкий к нему) уровень стойкости системы к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов.

Рассмотрим объект, показанный на рис. 1. Он представляет собой заданную сеть с фиксированным расположением узлов-потребителей B, C, D и E.

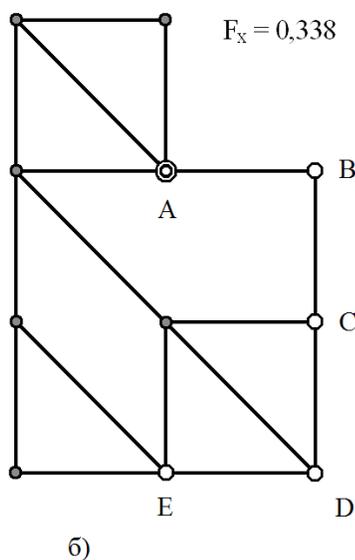


Рис. 2. Альтернативные варианты структурных схем с различным расположением узла-источника.

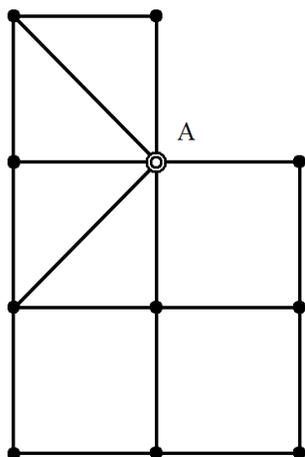


Рис. 3. Исходный сетевой объект с фиксированным расположением узла-источника А.

Требуется установить расположение узла-источника, при котором достигается наиболее высокий уровень стойкости системы к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов. В такой постановке задача может быть решена с использованием указанных ранее рекомендаций.

Так, на рис. 2а показано решение, позволяющее получить наиболее высокое значение показателя стойкости F_x . Связано это с тем, что источник продукта расположен в узле с наибольшей в системе валентностью 4 (под валентностью понимается общее количество сходящихся в узел трубопроводов). Кроме того, три из четырёх

сходящихся в узел А линейных элементов принадлежат подмножеству $G1^1$.

На рис. 2б приводится альтернативное решение, при котором источник продукта также находится в узле с валентностью 4. Однако из четырёх сходящихся в этот узел линейных элементов только один принадлежит подмножеству $G1$.

С учётом указанных структурных особенностей первый вариант решения задачи следует оценить как предпочтительный. Результаты определения значений F_x для каждого из этих двух случаев приведены на рис. 2. Видно, что значение показателя стойкости для первого варианта больше, чем для второго, примерно в 1,11 раза. Таким образом, задача выбора расположения источника решается так, чтобы используемый для этой цели узел имел высокую валентность, а сходящиеся в него линейные элементы по возможности принадлежали подмножеству $G1$. Если таким условиям отвечает несколько альтернативных вариантов, то для принятия окончательного решения следует уточнить значение F_x для каждого из них.

Рассмотрим теперь особенности процедуры структурного синтеза, предусматривающей поиск расположения потребителей целевого продукта.

¹Автор оперирует следующими обозначениями подмножеств: $G1$ источник – потребитель, $G2$ потребитель – потребитель, $G3$ потребитель – распределительный узел, $G4$ распределительный узел – распределительный узел, $G5$ источник – распределительный узел.

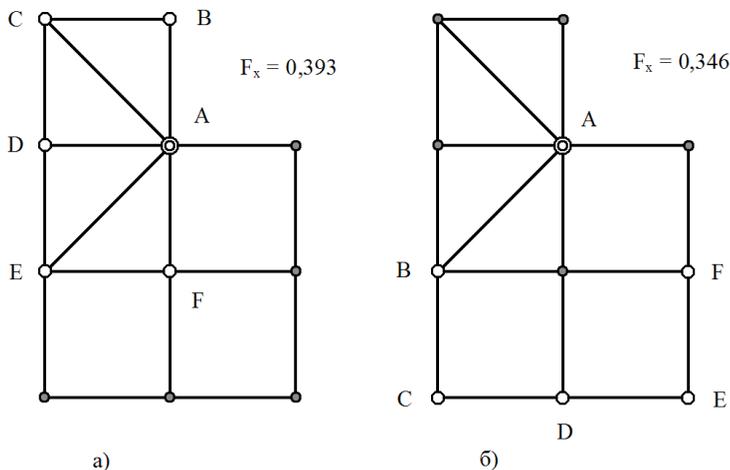


Рис. 4. Альтернативные варианты структурных схем с различным расположением узлов-потребителей В, С, D, E и F.

Постановка задачи. Для заданной сетевой структуры с неизменным положением узла-источника надо выбрать места расположения потребителей целевого продукта. Синтезируемый при этом сетевой объект должен иметь высокую стойкость к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов.

Рассмотрим в этой связи структурную схему трубопроводной системы, показанную на рис. 3. Предположим, что в её состав требуется ввести пять потребителей целевого продукта. Узел-источник в анализируемой системе имеет валентность 6. Поскольку в состав сетевого объекта требуется включить пять потребителей, то наибольший положительный эффект будет достигнут в том случае, если каждого из потребителей соединить с источником продукта напрямую.

Один из вариантов решения такой задачи показан на рис. 4а. Количество элементов подмножества $G1$ в этом случае оказывается наибольшим. Если же потребители целевого продукта расположены так, как это показано на рис. 4б, то в составе рассматриваемого объекта количество элементов подмножества $G1$ оказывается наименьшим.

В этой связи можно предположить, что первый из рассмотренных вариантов решения задачи обладает лучшими свойствами. Результаты расчёта значений показателя стойкости к процессу прогрессирующей блокировки узлов приведены на рис. 4. Видно, что величина F_x , установленная для первого варианта, больше, чем для второго, примерно в 1,12 раза, что подтверждает высказанное предположение относительно ожидаемых свойств анализируемых объектов.

В указанной постановке задачи выбор расположения узлов-потребителей производится таким образом, чтобы каждый из них был по возможности связан с источником напрямую. Если указанным требованиям отвечают несколько альтернативных вариантов, то для принятия окончательного решения следует уточнить значение показателя стойкости F_x для каждого из них.

Рассмотрим теперь особенности процедуры структурного синтеза в том случае, когда задаётся только топология сетевого объекта.

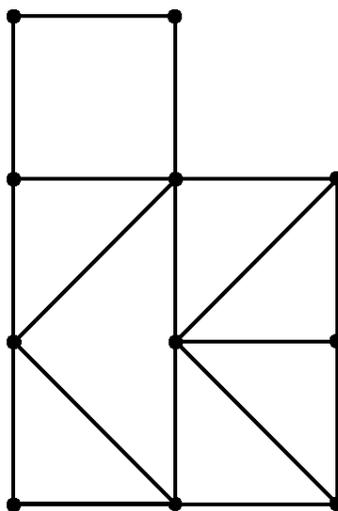


Рис. 5. Исходный граф как основа для формирования структурной схемы системы трубопроводного транспорта.

Постановка задачи. Для сетевого объекта с заданным набором связей между точечными элементами требуется определить положение узла-источника и узлов-потребителей целевого продукта, обеспечивающих достижение наибольших или близких к ним значений показателя стойкости F_x .

Предположим, исходная топология объекта описывается графом, показанным на рис. 5. Надо выбрать положение источника и пяти потребителей продукта таким образом, чтобы обеспечить наибольшее или близкое к нему значение F_x . Поскольку в составе рассматриваемой структуры присутствуют узлы с валентностью 5, то именно их и следует использовать при выборе положения узла-источника. Так, на рис. 6а приведена реализация указанного решения, причём узлы-потребители расположены так, что состав подмножества $G1$ оказывается наибольшим.

Альтернативное решение, показанное на рис. 6б, характеризуется низкой валентностью узла-источника, в который сходится всего два элемента подмножества $G5$. Результаты расчёта стойкости анализируемых объектов к развитию процесса прогрессирующей блокировки узлов приведены на рис. 6. Видно, что значение F_x для первого варианта больше, чем для второго, в 1,35 раза. То есть структурную схему, показанную на рис. 6а, и следует рассматривать как решение задачи синтеза.



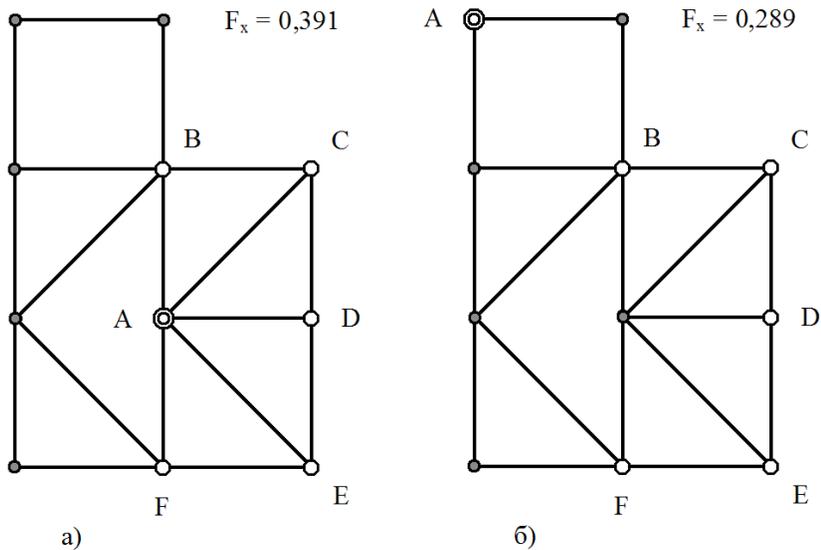


Рис. 6. Альтернативные варианты структурных схем трубопроводной транспортной системы.

Проблема выбора рациональных сетевых структур возникает также и при реконструкции действующих систем трубопроводного транспорта [7, 8].

Постановка задачи. Реконструкция расположенных поблизости трубопроводных систем предусматривает необходимость расширения их технологических возможностей за счёт включения в единую транспортную сеть. Структурный синтез новой системы связан как с введением дополнительных линейных элементов, так и с выбором расположения источника целевого продукта на базе одного из действующих узлов-источников объединяемых систем.

Решение такой задачи должно обеспечивать формирование нового сетевого объекта с высоким уровнем стойкости к развитию процесса прогрессирующей блокировки узловых элементов.

Предположим, что планируемые работы по реконструкции предусматривают объединение трёх независимо функционирующих трубопроводных систем, структурные схемы которых показаны на рис. 7. Объединение систем потребует введения как минимум двух дополнительных линейных элементов, а также выбора расположения узла-источника, способного выполнять свои функции в новых условиях.

Возможный вариант решения поставленной задачи приведён на рис. 8. Видно, что в новой системе узел-источник А, при-

надлежавший ранее системе № 1, сохранил своё положение и назначение, а остальные узлы-источники систем № 2 и № 3 стали выполнять роль распределительных узлов.

Такой вариант объединения трёх исходных трубопроводных систем в дальнейшем рассматривается как базовый.

Формирование альтернативных сетевых структур при поиске иных проектных решений можно воспринимать как результат трансформации этого базового варианта. Все планируемые изменения в составе базового объекта целесообразно ограничить установленными границами фрагмента Φ , показанного на рис. 8.

Рассмотрим образование объединённой системы, отличной от базовой, выбрав иные варианты расположения узла-источника в пределах Φ , как это показано на рис. 9а и 9б. Преимуществом указанных решений является возможность дальнейшего использования существующей инфраструктуры и оборудования, обеспечивающих функционирование узлов-источников объединяемых систем.

Однако перечисленные варианты решения задачи структурного синтеза не в состоянии обеспечить высокий уровень значений показателя стойкости:

1. Валентность узла-источника базовой структуры превышает валентность узлов-источников у представленных альтернативных решений.

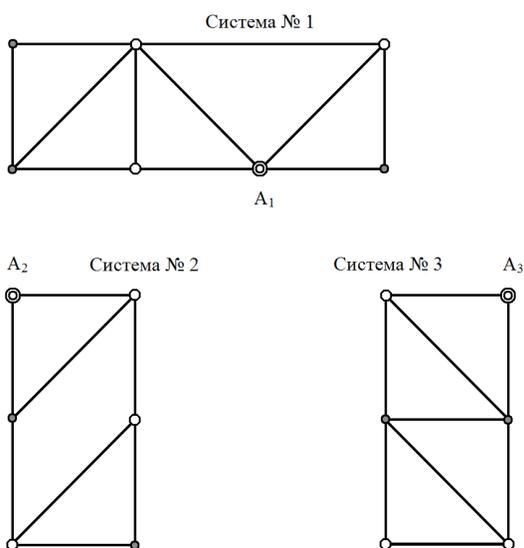


Рис. 7. Схема взаимного расположения трёх функционирующих трубопроводных систем до начала процедуры их объединения.

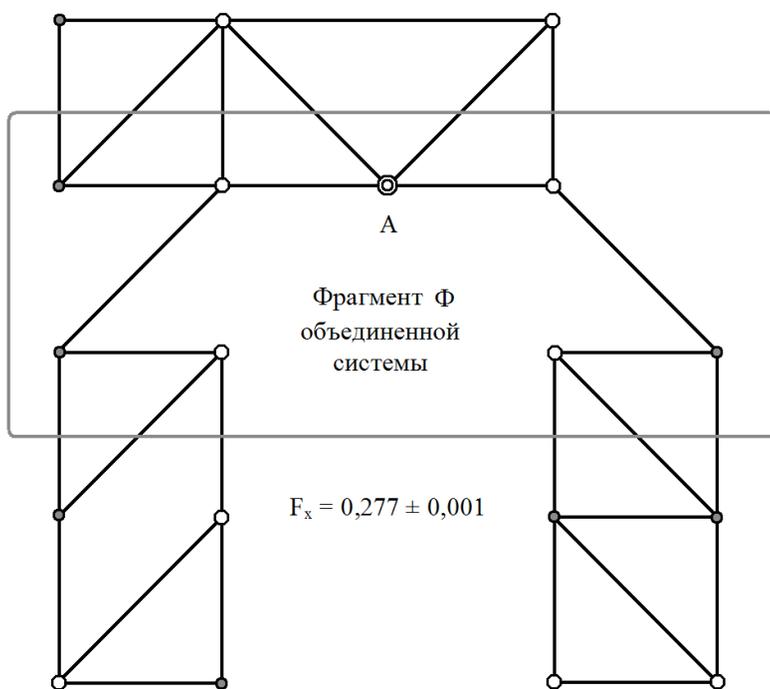


Рис. 8. Структурная схема базовой трубопроводной системы и расположение фрагмента Φ .

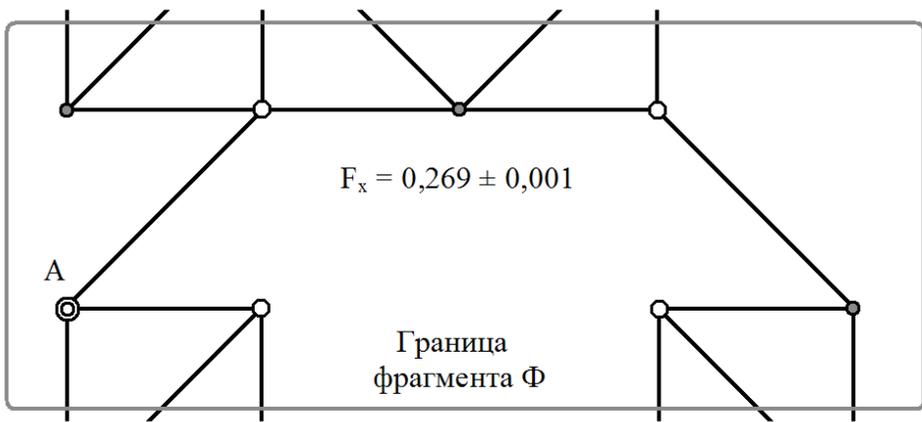
2. В узел-источник базовой структуры сходятся четыре трубопровода, принадлежащих подмножеству $G1$, а в узел-источник каждой из альтернативных структур только по два элемента из состава указанного подмножества.

В этой связи следует предположить, что из рассмотренных трёх вариантов формирования сетевой структуры именно базовый обладает наилучшими свойствами.

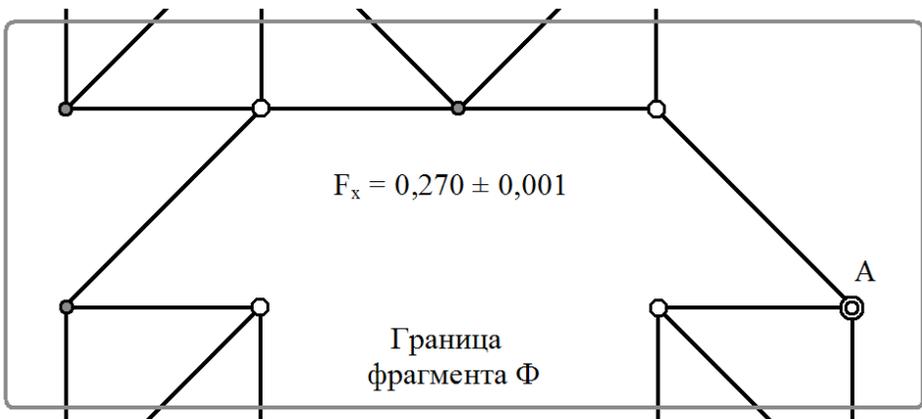
Значения F_x , установленные для каждого из этих вариантов, приведены на рис. 9. Видно, что высказанное предположение оказывается справедливым, а базовая схема как раз и является одним из наилучших вариантов решения поставленной задачи.

В то же время следует отметить, что свойства базового объекта могут быть заметно улучшены, если увеличить валент-





а)



б)

Рис. 9. Альтернативные варианты расположения узла-источника в границах фрагмента Φ объединённой системы.

ность узла А на две единицы, как это показано на рис. 10.

При реализации такого решения прирост валентности узла-источника происходит за счёт добавления элементов подмножества $G1$, сходящихся в этот точечный элемент. Поскольку схема трубопроводной системы, показанная на рис. 10, характеризуется наибольшим значением показателя стойкости, то именно её и следует рассматривать как решение поставленной оптимизационной задачи структурного синтеза.

Таким образом, решение задач структурной оптимизации сетевых объектов следует выполнять на основе разработанных методов и рекомендаций с учётом установленных закономерностей развития процессов прогрессирующего повреждения узловых элементов транспортных систем.

ВЫВОДЫ

1. Наивысший уровень стойкости сетевых структур к развитию процесса прогрессирующей блокировки транспортных узлов достигается в системах с наибольшим количественным составом подмножества $G1$, а также при условии высокой валентности узла-источника целевого продукта.

2. Выбор расположения источника в заданной сетевой структуре с известным расположением узлов-потребителей осуществляется таким образом, чтобы используемый узел имел высокую валентность, а сходящиеся в этот узел элементы принадлежали по возможности к подмножеству $G1$.

3. Выбор расположения узлов-потребителей в заданной сетевой структуре с известным положением источника осуществляется так, чтобы каждый из потребителей был по возможности связан с источником продукта напрямую.

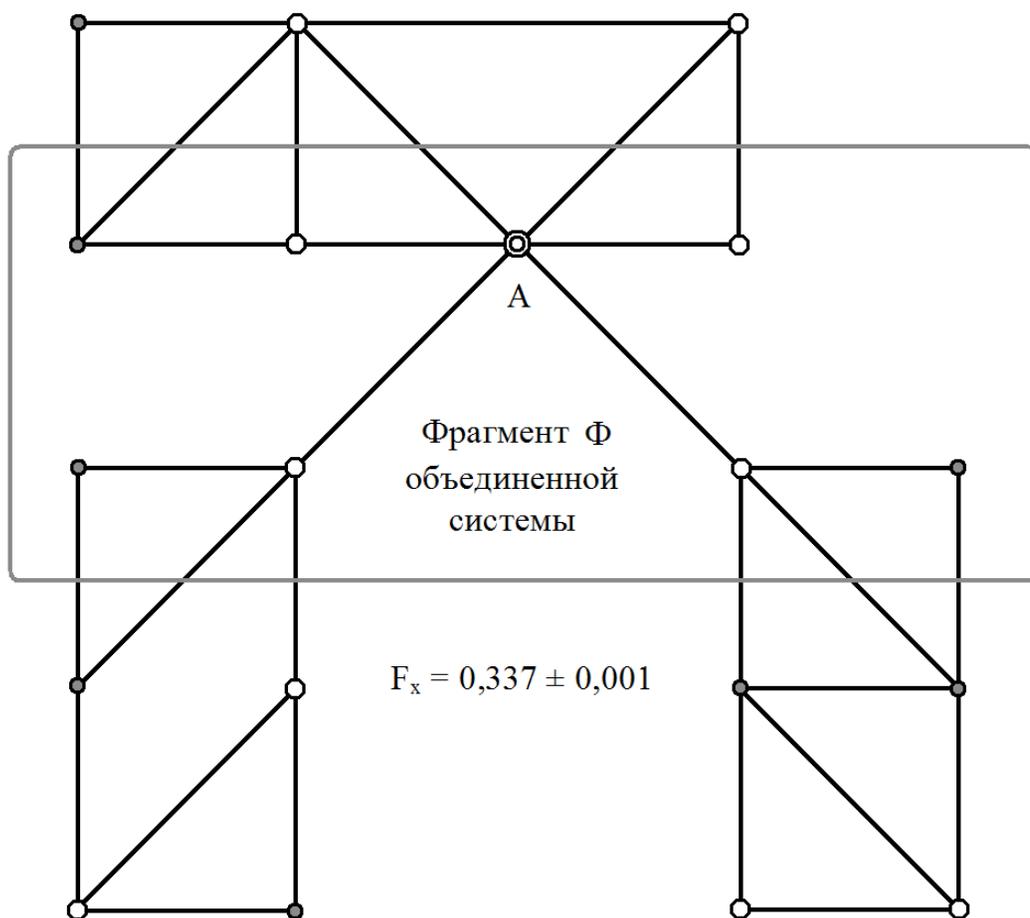


Рис. 10. Структурная схема трубопроводной системы с валентностью 6 узла-источника.

4. Выбор варианта взаимного расположения источника и потребителей продукта в структуре заданной топологии следует выполнять так, чтобы обеспечивалось наибольшее значение показателя стойкости F_x .

5. Структурная оптимизация действующих трубопроводных систем в условиях их объединения при реконструкции выполняется так, чтобы при минимальном числе дополнительных линейных элементов обеспечить высокий уровень значений показателя стойкости F_x .

ЛИТЕРАТУРА

1. Коршак А. А., Нечваль А. М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. – СПб.: Недра, 2008. – 488 с.

2. Дейнеко С. В. Обеспечение надёжности систем трубопроводного транспорта нефти и газа. – М.: Техника, Тума Групп, 2011. – 176 с.

3. Тарарычкин И. А., Блинов С. П. Особенности повреждения сетевых структур и развития аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 3. – С. 35–39.

4. Тарарычкин И. А. Обеспечение стойкости трубопроводных систем к повреждениям элементов сетевой структуры // Надёжность. – 2018. – № 1. – С. 26–31.

5. Татт У. Теория графов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 424 с.

6. Новосельцев В. И., Тарасов Б. В., Голиков В. К. и др. Теоретические основы системного анализа. – М.: Майор, 2006. – 592 с.

7. Орлов В. А. Строительство и реконструкция инженерных сетей и сооружений. – М.: Академия, 2010. – 304 с.

8. Храменков С. В., Примин О. Г., Орлов В. А. Реконструкция трубопроводных систем. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2008. – 216 с.

Координаты автора: **Тарарычкин И. А.** – donbass_8888@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 14.05.2018, принята к публикации 20.06.2018.

