

УДК 622.69; 621.6-52

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ
НЕФТЕПРОВОДОВ ПО ПЕРЕКРЫТИЮ ПОТОКА**

**APPLICATION OF GRAPH THEORY WHEN DESIGNING THE
SYSTEM AUTOMATIC PROTECTION TRUNK OIL PIPELINES
FLOW SHUTOFF**

Бархатов А. Ф., Вязунов Е. В., Дрожжинов С. Ф., Савельев А. В.

**ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация**

АО «Гипротрубопровод», г. Москва, Российская Федерация

A. F. Barkhatov, E. V. Vyazunov, S. F. Drozhzhinov, A. V. Savelyev

**FSBEI NPE National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, the Russian Federation**

JSC “Giprotruboprovod”, Moscow, the Russian Federation

e-mail: barkhatov-alex@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача нахождения всех секущих комбинаций задвижек на технологическом участке нефтепровода. Закрытие задвижек секущей комбинации приводит к перекрытию потока на технологическом участке, что может привести к аварии. Технологическая схема участка представляется в виде графа – графа технологической схемы (ГТС). ГТС задается списком ребер. Вершинами графа являются точки ветвления трубопроводов и некоторые технологические установки, например резервуарные парки. Ребрами графа являются отрезки трубопроводов с задвижками и (или) обратными затворами, насосные станции. ГТС представляет собой связный граф. Для

проверки возможности перекрытия потока используется алгоритм построения связного графа методом «ядра и оболочки» по открытым задвижкам. В процессе построения связного графа определяется направление, в котором возможно течение жидкости от источника к стоку – индуцированное направление, а также степень каждой вершины. Для сокращения числа анализируемых вариантов выполняется «сжатие» графа технологической схемы за счет замены одним эквивалентным ребром с одной эквивалентной задвижкой элементарной цепи и группы параллельных цепей. Генерирование анализируемых комбинаций задвижек выполняется методом «поиска в ширину с отсечением», что также позволяет радикально сократить количество анализируемых комбинаций. Оперативный контроль перекрытия потока осуществляется на основе информации о текущем состоянии всех задвижек технологического участка. Если в списке текущих комбинаций находится хотя бы одна комбинация, все задвижки которой по данным оперативного короля не открыты, то система формирует сообщение о возможном перекрытии потока.

Abstract. The problem of finding all intersecting combinations of valves in the technology section of the pipeline. Closing valves secant combination results in an overlap area of the process stream at that might cause an accident. Technological scheme of the site is represented in the form of a graph – a graph of the technological scheme (GTS). CTS is given a list of edges. The vertices of the graph are the branching point of pipelines and some technological systems, such as tank farms. The edges of the segments are the pipelines with valves and (or) check valve, pump stations. CTS is a connected graph. To test the possibility of overlap flow algorithm for constructing a connected graph by the «core and shell» for open valve. In the process of building a connected graph is determined by the direction in which it is possible for the fluid from the source to the drain – induced by the direction and the degree of each vertex. To reduce the number of analyzed variants performed «compression» of the graph of the

technological scheme by replacing one equivalent edge with one-engine equivalent of an elementary circuit and a group of parallel chains. Generating analyzed combinations of valves is done by the «breadth-first search with a cut-off», which also allows you to drastically reduce the number of combinations analyzed. Operational control shut-off is based on the current status of all valves technological area. If the list of cross-sections of combinations is at least one combination of all valves which according to the operational king are not open, then the system generates a report of a possible overlap flow.

Ключевые слова: перекрытие потока, секущая комбинация задвижек, граф технологической схемы, построение связного графа, сжатие графа, поиск в ширину с отсечением.

Key words: shutoff of oil, split combination valves, Earl technological scheme, the construction of a connected graph, compression graph breadth-first search with a cut-off.

В настоящее время нефтепроводы оснащаются централизованными системами противоаварийной автоматики (ЦСПА), позволяющими существенно повысить надёжность и безопасность эксплуатации нефтепроводов. Одной из наиболее важных и сложных задач системы является задача защиты МН от несанкционированного перекрытия потока [1]. Задача решается с использованием методов теории графов.

Суть задачи сводится к тому, чтобы по состоянию задвижек (открыта, закрыта, открывается, закрывается, зафиксирована в промежуточном состоянии) на работающем технологическом участке нефтепровода определить, не приведёт ли закрытие определённых задвижек к перекрытию потока, что в свою очередь повлечёт гидравлический удар и возможное разрушение трубопровода. Кроме того, необходимо установить, закрытие каких именно задвижек приводит к перекрытию

потока и какие из закрывающихся задвижек необходимо остановить, чтобы предотвратить гидравлический удар.

Ввиду большой сложности решения такой задачи в реальном масштабе времени (по фактическому состоянию задвижек) было принято решение осуществить её реализацию в два этапа:

1. На стадии проектирования найти все возможные комбинации задвижек, закрытие которых приводит к перекрытию потока, а в реальном времени проверять, имеются ли среди фактически закрывающихся задвижек такие комбинации;

2. В реальном времени по фактическому состоянию задвижек определять, не произойдет ли гидравлический удар, и выдавать соответствующие рекомендации или автоматически формировать соответствующие команды управления.

Некоторые результаты решения задачи первого этапа могут использоваться при тестировании программ и подготовке исходных данных.

«Прямолинейный» подход к решению задачи первого этапа – сформировать все различные комбинации из одной, двух, трёх и т.д. задвижек и проверить каждую из этих комбинаций на возможность перекрытия потока при закрытии всех задвижек, входящих в комбинацию. При этом число анализируемых комбинаций равно сумме числа сочетаний C_n^m из общего числа n задвижек по $m = 1, 2, \dots, n$ задвижек. Известно, что эта сумма равна 2^n , т.е. при $n = 100$ число таких сочетаний составляет $2^n \approx 10^{30}$, что делает практическую реализацию такого подхода абсолютно нереалистичной.

Имеется два способа сокращения количества перебираемых вариантов:

- уменьшение числа задвижек, из которых формируются анализируемые комбинации;
- сокращение числа анализируемых комбинаций.

Представление технологической схемы трубопровода в виде графа

Эффективные способы решения многих решаемых для технологических схем задач предлагает теория графов [2-4].

Схема технологического участка трубопровода представляется в виде графа технологической схемы, рёбрами которого являются отрезки трубопровода с задвижками, обратными затворами, насосные станции, а вершинами – точки ветвления трубопроводов и различные технологические установки. Следует принять определённую классификацию вершин – технологических установок, например, источник, сток. Конкретный набор типов технологических установок определяется схемой и спецификой решаемых задач. В данной работе обязательно выделение источников и стоков перекачиваемой жидкости в уникальный тип технологических установок. Источниками и стоками, как правило, являются точки выхода и входа нефти из резервуарного парка. ГТС является графом смешанного типа, в котором имеются как направленные рёбра, так и ненаправленные. В направленном ребре поток жидкости возможен только в одну сторону, в ненаправленном ребре – в любую сторону. Направленное ребро содержит обратный затвор.

Граф технологической схемы задаётся списком рёбер, содержащим:

- 1) номера вершин, соединяемых ребром;
- 2) тип ребра – 0, если ребро ненаправленное, и 1, если ребро направленное;
- 3) технологический номер задвижки (насосной станции);
- 4) характеристики ребра – конкретный перечень характеристик определяется спецификой решаемых задач (например, расстояния первой и второй вершин от начала трубопровода, диаметр и толщина стенки трубы и т.д.).

Рассматриваются графы, не содержащие петель.

Порядок записи вершин по п.1 для ненаправленных рёбер произволен, для направленных рёбер возможное направление потока должно

соответствовать порядку перечисления вершин: от первой ко второй вершине. Направление, задаваемое порядком перечисления вершин, называется каноническим направлением. Порядковые номера рёбер в списке называются системными номерами, которые и используются в вычислениях. Для представления информации персоналу используются технологические номера (шифры) оборудования.

ГТС может являться связным графом, т.е. таким графом, для любой пары вершин которого имеется соединяющий их путь. В некоторых случаях ГТС может состоять из нескольких компонент - не связанных друг с другом графов (компонент связности), но имеющих в своём составе стоки и источники. В этом случае перечисленные задачи решаются для каждого из графов независимо друг от друга.

Построение связных графов

При решении многих задач, в том числе перечисленных, применяется процедура построения связных графов методом «ядра и оболочки».

Ядром называется некоторая совокупность вершин и ребер графа, если эта совокупность обладает следующими свойствами:

- 1) указанное множество вершин и ребер является связным графом;
- 2) указанное множество ребер включает все ребра, соединяющие вершины множества и только эти ребра.

Оболочкой ядра графа называется множество не принадлежащих ядру вершин графа, каждая из которых может быть соединена одним ребром графа с одной из вершин ядра. Полная оболочка содержит все вершины графа, обладающие указанным свойством. Очевидно, что любая вершина графа является и его ядром и полной оболочкой этого ядра.

Пусть на каком-то этапе вычислений построено ядро графа и его полная оболочка. Если перебрать все не вошедшие в ядро открытые ребра

и включить в ядро (расширенное) те из них которые, инцидентны¹ вершинам оболочки, включая ребра, соединяющие между собой вершины оболочки, то другие (не вошедшие в оболочку и присоединяемые к связному графу) вершины этих ребер составят новую оболочку расширенного ядра. Вошедшие в состав ядра ребра удаляются из списка открытых ребер. Таким образом, по завершении перебора всех открытых ребер полностью строится новое, расширенное ядро графа, а присоединенные вершины представляют собой полную оболочку расширенного ядра. На каждом следующем этапе анализируются только открытые ребра, не включенные ранее в ядро, и определяются вершины новой оболочки, что значительно сокращает объем вычислительной работы. Когда в списке анализируемых ребер не остается ни одного элемента, построение связного графа завершено. Порядок следования присоединяемых к связному графу ребер и вершин определяет индуцированное направление.

В частности построение связного графа используется для определения степени вершин St (количество ребер графа инцидентных вершине) ГТС. Для этого на основе списка ребер ГТС, формируется связный граф, исходя из того, что все ребра открыты. Так как в процессе построения связного графа фиксируется подсоединение каждого ребра к какой-либо вершине, то по завершении построения определяется степень каждой вершины.

Сжатие графа технологической схемы

Число ребер и вершин в графе можно уменьшить, если объединить ряд последовательно соединённых ребер без промежуточных точек ветвления трубопровода между этими ребрами в одно эквивалентное ребро с одной эквивалентной задвижкой. В теории графов такая последовательность ребер называется элементарной цепью. Элементарная цепь однозначно определяется перечнем входящих в неё вершин $(v_0, e_1, \dots, e_k, v_k)$ или

¹ Ребро, соединяющее две вершины инцидентно этим вершинам.

перечнем рёбер (z_1, z_2, \dots, z_k) , где v_0, v_k – начало и конец цепи соответственно. В частном случае элементарная цепь содержит только одно ребро. Элементарная цепь открыта (для потока жидкости), если открыты задвижки на всех рёбрах цепи, и цепь закрыта, если закрыта задвижка, хотя бы на одном из рёбер цепи. Например, граф, изображённый на рисунке 1, содержит элементарную цепь CD с задвижками 6÷9.

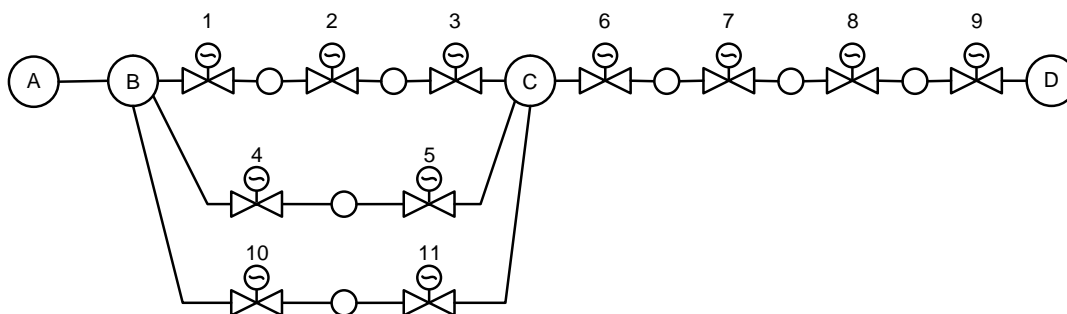


Рисунок 1. Пример графа, содержащего элементарную цепь и группу параллельных цепей

Поскольку закрытие любой из указанных задвижек приводит к перекрытию потока в цепи, то эквивалентная задвижка закрывается, если закрывается, хотя бы одна из этих задвижек.

Элементарная цепь однозначно определяется перечнем входящих в неё вершин $(v_0, e_1, \dots, e_k, v_k)$ или перечнем рёбер (z_1, z_2, \dots, z_k) , где v_0, v_k – начало и конец цепи соответственно, а e_1, \dots, e_k – промежуточные вершины, перечислены в порядке их следования по пути от v_0 до v_k . Т.е. v_0 и v_k являются началом и концом цепи соответственно. В перечне (z_1, z_2, \dots, z_k) рёбра перечисляются в том порядке, в котором они соединяют пары вершин $v_0-e_1, e_1-e_2, \dots, e_k-v_k$. Направление от начала к концу цепи является индуцированным.

Для нахождения всех элементарных цепей в ГТС выполняется построение связного графа. Сначала формируется список рёбер SR, подлежащих анализу, совпадающий со списком всех рёбер ГТС. Построение графа начинается с вершины-источника, каноническое

направление ребра, соединяющего источник с другой вершиной, – от источника к другой вершине. Это направление является индуцированным для всех последующих присоединяемых рёбер. Понятия канонического и индуцированного направлений иллюстрируются рисунком 2. Исходя из определения элементарной цепи, все её вершины, кроме начала v_0 и конца цепи v_k , должны иметь степень 2. Исключение составляют только источники и стоки, их степень равна 1. Таким образом, первое присоединенное ребро может оказаться элементарной цепью, если степень $v_k > 2$. Тогда первая цепь сформирована. В противном случае продолжается поиск рёбер, инцидентных v_k до тех пор, пока все рёбра инцидентные v_k не будут проанализированы. Другая (не v_k) вершина анализируемого ребра включается в состав оболочки строящегося графа. Особый случай возникает при анализе ребра с обратным затвором: если каноническое направление этого ребра не совпадает с индуцированным направлением, то все ранее включённые в состав цепи ребра, как и анализируемое ребро, исключаются из SR. Процедура повторяется до тех пор, пока не будут проанализированы все рёбра. По завершении построения элементарной цепи формируется список рёбер (z_1, z_2, \dots, z_k) каждой цепи. Цепям присваиваются номера в порядке их формирования. Список рёбер ГТС пополняется следующими характеристиками: число и номера цепей инцидентных вершинам v_0, v_k .

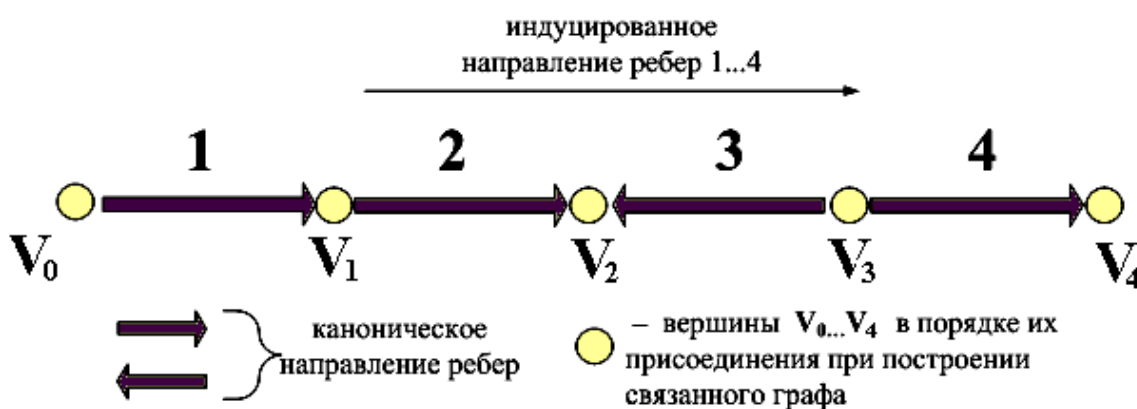


Рисунок 2. Каноническое и индуцированное направления

Когда все элементарные цепи в ГТС построены, формируется граф ГТС_Е путём замены каждой элементарной цепи одним эквивалентным ребром с одной эквивалентной задвижкой и исключением из ГТС всех рёбер цепи.

Дальнейшее сжатие графа возможно за счёт объединения группы параллельных цепей в одну цепь с эквивалентной задвижкой и исключением соответствующих элементарных цепей. Группой параллельных цепей будем называть все элементарные цепи, соединяющие одну и ту же пару вершин. То есть, если у одной из параллельных цепей началом и концом являются вершины v_0 и v_k соответственно, то для начала v_0' и конца v_k' любой другой цепи из группы выполняются соотношения:

$$v_0 = v_0' \text{ и } v_k = v_k'$$

$$\text{или } v_0 = v_k' \text{ и } v_k = v_0'.$$

Ребро, входящее в состав одной из элементарных цепей группы, не может входить в состав любой другой элементарной цепи, как входящей в состав данной группы, так и в состав других элементарных цепей.

Если найти все группы параллельных цепей в графе ГТС_Е и заменить каждую группу одной эквивалентной цепью, то получим граф ГТС_П со значительно меньшим количеством рёбер и вершин, чем в исходном графе ГТС. Эквивалентная цепь закрыта, если все вошедшие в неё элементарные цепи закрыты, и эквивалентная цепь открыта, если открыта, хотя бы одна из вошедших в неё цепей.

Использование сжатого графа ГТС_П, радикально снижает размерность задач, связанных с перебором комбинаций состояния разных задвижек. Масштаб такого сокращения иллюстрируется таблицей 1. В таблице представлены данные по результатам разработки ЦСПА для 25 технологических участков системы нефтепроводов АК «Транснефть» Максимальное число рёбер и вершин в ГТС данных участков составляет 189 и 143 соответственно. После сжатия граф технологической схемы в среднем «сжался» в 25 раз по числу рёбер и в 12 раз по числу вершин. Максимальное сжатие составило 156 и 60 раз соответственно.

Формирование секущих комбинаций задвижек

С точки зрения теории графов закрытие задвижек, т.е. удаление из графа соответствующих рёбер может приводить к разным результатам:

- образуется разрез графа. При этом граф распадается в общем случае на несколько компонент связности;

- образуется сечение графа. При этом образуется две компоненты связности. Сечение является простым, если любое подмножество рёбер этого сечения не является сечением. Иными словами в простом сечении нет ни одного «лишнего» ребра, удаление которого повлияло бы на результат деления графа данным сечением. То есть и без этого ребра сечение делило бы граф на две компоненты связности. Например, любая комбинация рёбер цепи CD на рисунке 1 является сечением, но простым сечением является только каждое ребро этой цепи в отдельности, образование разреза не происходит.

Перекрытие потока может произойти только в случае образования сечения, если при этом в одной из образовавшихся компонент связности имеется источник, а в другой компоненте отсутствует сток. Комбинацию задвижек, образующих такое сечение, будем называть секущей комбинацией задвижек. На рисунке 3 приведен пример графа с секущими комбинациями задвижек. При исключении из графа любой из указанных комбинаций ребер образуется простое сечение.

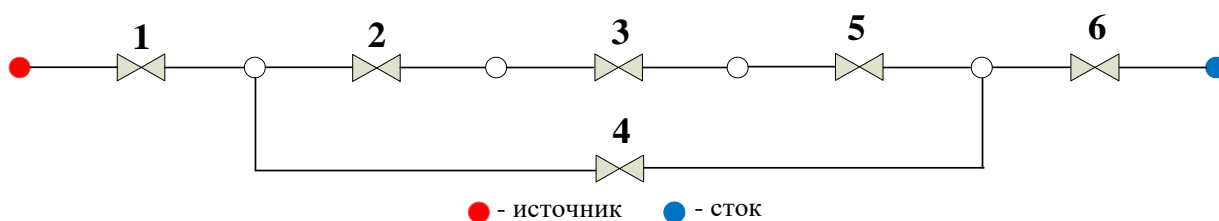


Рисунок 3. Секущие комбинации
 1; 6; 2,4; 3,4; 4,5: 1...6 – ребра

Формирование подлежащих анализу комбинаций выполняется методом поиска в ширину с отсечением [5] и иллюстрируется рисунком 4.

Дерево для поиска секущих комбинаций формируется следующим образом. Задвижки нумеруются в произвольном порядке. Каждая вершина дерева является комбинацией состояния задвижек, представленного в виде бинарного массива (если i -й элемент массива равен 0, то i -я задвижка открыта, иначе – закрыта). Корень дерева – пустая комбинация (все задвижки открыты – все элементы массива равны 0). Ребра дерева соединяют его вершины, если комбинация второй вершины («потомка») может быть получена из комбинации первой вершины («родителя») добавлением одной закрытой задвижки. Для исключения циклов при формировании дерева «потомки» должны быть получены добавлением задвижки с номером большим, чем последняя закрытая задвижка комбинации «родителя» (рисунок 4).

Иначе, «потомки» получены добавлением одной задвижки после последней закрытой задвижки в комбинации «родителя». Если добавить задвижку в комбинацию нельзя (в комбинации «родителя» закрыта последняя задвижка), то у вершины нет «потомков».

При таком способе формирования дерева вершины одного уровня (находящиеся на одном расстоянии от корня дерева) содержат одинаковое количество закрытых задвижек.

При обходе дерева в ширину на каждом шаге проверяется, не является ли комбинация вершины дерева секущей комбинацией задвижек, т.е. не приводит ли исключение соответствующих рёбер к образованию сечения графа. Если сечение образовалось, то данная комбинация пополняет список секущих комбинаций, и «потомки» этой комбинации не формируются. Если рассматриваемая комбинация содержит ранее сформированное сечение, то формирование потомков этой комбинации не происходит. В результате обеспечивается включение в список секущих комбинаций только простых сечений и происходит отсечение целых

ветвей соответствующего дерева комбинаций. Следовательно, число анализируемых комбинаций значительно сокращается. Из таблицы 1 видно, что максимальное число секущих комбинаций задвижек в рассмотренных графах составило 1309, среднее – 179. Характерно, что наибольшее число секущих комбинаций наблюдается на технологическом участке, состоящем из двух параллельных нефтепроводов с соединяющими эти нефтепроводы перемычками.

Максимальное время выполнения программы сжатия ГТС и формирования секущих комбинаций для рассмотренных технологических участков составило 7,5 мин.

Оперативный контроль перекрытия потока

Секущие комбинации рёбер ГТС определяют секущие комбинации задвижек, закрытие которых приведёт к полному перекрытию потока нефти. Данная ситуация недопустима из соображений безопасности процесса перекачки нефти.

В процессе работы нефтепровода ЦСПА обеспечивает непрерывный контроль перекрытия потока нефти на основе анализа состояния задвижек, входящих в состав секущих комбинаций задвижек. Информация о текущем состоянии задвижек поступают в ЦСПА из сервера системы диспетчерского контроля и управления (СДКУ) в виде обобщенного сигнала состояния, принимающего следующие значения: «открыто», «закрыто», «открывается», «закрывается», «промежуточное положение», «авария».

Диагностика достоверности информации о состоянии задвижки осуществляется следующим образом:

1. Программные модули «дайверов-опросчиков» (в сервере СДКУ) обеспечивают контроль работоспособности каналов обмена данными с контроллерами линейной телемеханики (ЛТМ) и микропроцессорной системы автоматики (МПСА) НПС.

2. Программный модуль «ОРС-сервер» (в сервере СДКУ) обеспечивает контроль работоспособности драйверов-опросчиков, взаимодействующих с контролерами ЛТМ и МПСА НПС.

3. По результатам работы «драйверов-опросчиков» и контроля их состояния «ОРС-сервер» формирует признаки достоверности (Quality) сигналов состояния задвижек.

4. Сервер СДКУ на основе сигналов состояния и сигналов неисправности задвижек формирует обобщённые сигналы состояния задвижек и на основе признаков достоверности сигналов состояния и сигналов неисправности задвижек формирует обобщённые признаки достоверности обобщённых сигналов состояния задвижек. Данная информация передаётся в ЦСПА.

5. ЦСПА на основе поступающих из СДКУ обобщённых сигналов состояния задвижек и признаков их достоверности, формирует интегральные сигналы состояния задвижек. При наличии в течение 60 секунд сигналов неисправности задвижек или если отсутствуют признаки достоверности обобщённых сигналов состояния задвижек, интегральный сигнал состояния задвижки принимает значение «неизвестное состояние». До истечения данной выдержки времени интегральный сигнал состояния задвижки сохраняет предыдущее значение.

Если все задвижки текущей комбинации одновременно закрываются либо закрыты, ЦСПА формирует соответствующее оперативное сообщение и с выдержкой времени (30 с – при наличии закрывающихся задвижек в текущей комбинации и 0 с – при всех закрытых задвижках) осуществляет аварийную остановку технологического участка (ТУ).

Если состояние какой-либо задвижки недостоверно, ЦСПА в качестве текущего состояния задвижки в течение заданного времени (1 мин) использует последнее зафиксированное достоверное значение. По истечении указанного времени состояние такой задвижки в ЦСПА считается неизвестным. Если имеются текущие комбинации с участием

задвижки с неизвестным состоянием, и остальные задвижки текущей комбинации закрываются или закрыты, то ЦСПА формирует оперативное сообщение о возможном перекрытии потока, но не выполняет аварийную остановку ТУ.

Для проведения пуско-наладочных работ и регламентных проверок работоспособности в ЦСПА предусмотрено маскирование защит по перекрытию потока нефти. Маскирование защиты осуществляется за счет установки признака маскирования, соответствующего контролируемой защитой задвижке, при этом ЦСПА продолжает контролировать состояние данной задвижки. В случае идентификации процесса перекрытия нефти текущей комбинацией задвижек, в составе которой имеется задвижка с установленным признаком маскирования, ЦСПА формирует соответствующее оперативное сообщение, но не выполняет аварийную остановку ТУ.

В процессе аварийной остановки ТУ осуществляется одновременное отключение всех НПС, расположенных выше по потоку нефти относительно участка, где ЦСПА идентифицировала перекрытие потока нефти. Отключение НПС, расположенных ниже по потоку нефти, осуществляется либо диспетчером вручную, либо станционными защитами, например, по предельному/аварийному давлению на входе МНС.

Таблица 1. Сжатие графа технологической схемы

Участок	Исходный граф ГТС		Сжатый граф		R/NR	V/NV	Число секущих комбинаций в сжатом графе
	ребер R	вершин V	ребер RN	вершин NV			
1	189	143	37	23	5,11	6,2	1105
2	40	29	10	8	4,00	3,6	56
3	107	92	25	18	4,28	5,1	145
4	134	111	36	26	3,72	4,3	1309
5	44	37	1	2	44,0	18,5	38
6	29	20	12	8	2,42	2,5	19
7	14	13	1	2	14,0	6,5	10
8	23	15	12	8	1,92	1,88	15
9	9	9	1	2	9,00	4,5	6
10	47	36	10	7	4,70	5,1	65
11	125	87	26	17	4,81	5,1	134
12	138	99	43	25	3,21	4,0	329
13	146	112	1	2	146	56,0	187
14	156	120	1	2	156	60,0	200
15	67	51	6,09	7,3	6,09	3,0	90
16	142	111	19	14	7,47	7,9	164
17	97	77	12	9	8,08	8,6	103
18	87	69	1	2	87,0	34,5	68
19	56	44	1	2	56,0	22,0	55
20	25	20	1	2	25,0	10,0	18
21	148	109	42	27	3,52	4,0	148
22	26	19	10	7	2,60	2,7	80
23	26	20	10	9	2,60	2,2	21
24	26	20	1	2	26,0	10,0	25
25	96	74	18	12	5,33	6,2	89
Среднее значение			-	-	25	12	179
Максимальное значение			-	-	156	60	1309
Минимальное значение			-	-	1,9	1,9	6,0

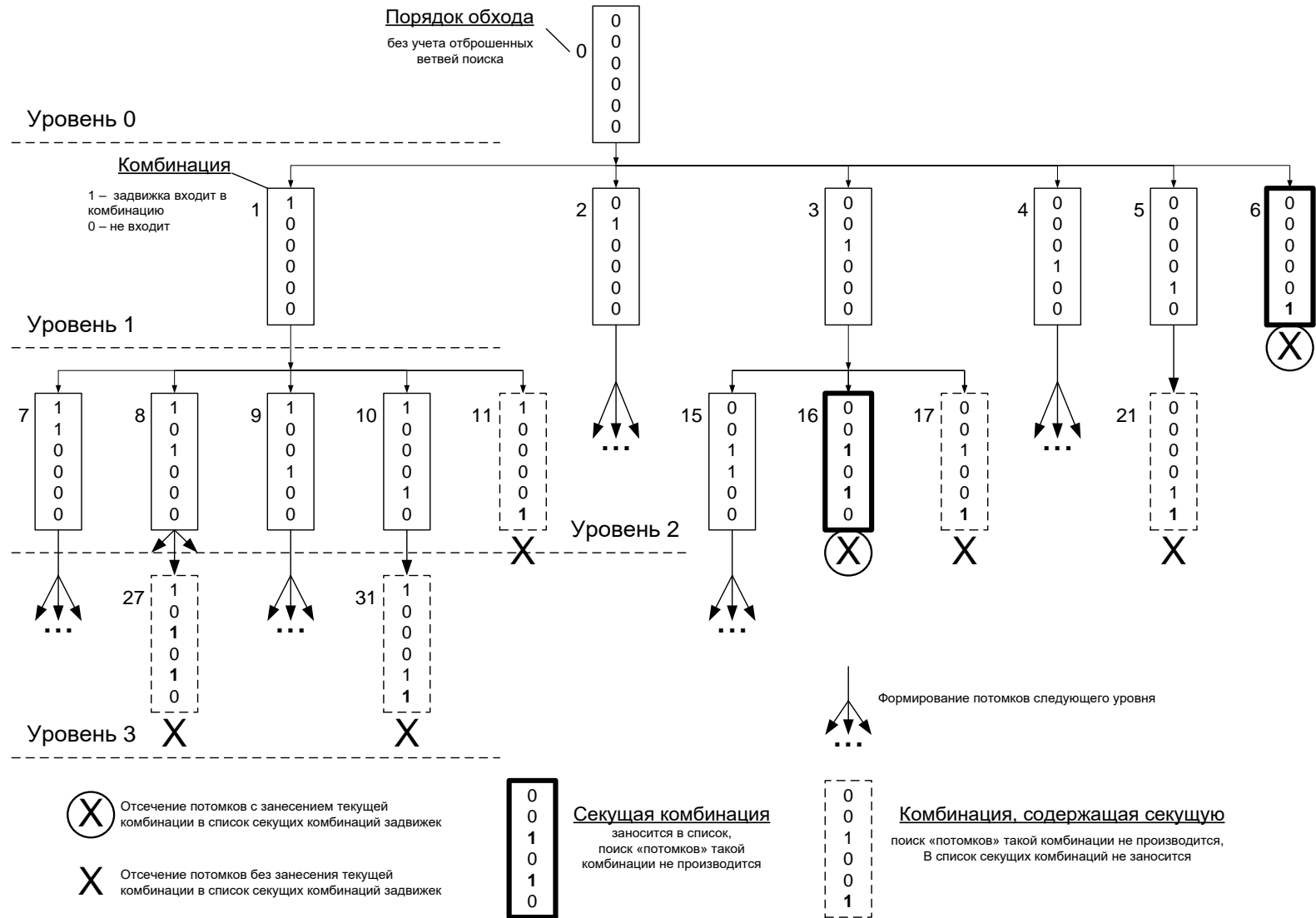


Рисунок 4. Схема поиска в ширину с отсечением

Выводы

Разработана методика и компьютерная программа нахождения всех текущих комбинаций задвижек, закрытие которых приводит к перекрытию потока на технологическом участке нефтепровода и возникновения текущих комбинаций на работающем нефтепроводе по информации о состоянии задвижек на работающем нефтепроводе.

Разработаны централизованные системы противоаварийной автоматики для 25 технологических участков:

- максимальное число рёбер и вершин в ГТС данных участков составляет 189 и 143 соответственно;

- после сжатия граф технологической схемы в среднем «сжался» в 25 раз по числу рёбер и в 12 раз по числу вершин. Максимальное сжатие составило 156 и 60 раз соответственно;

- максимальное число текущих комбинаций задвижек в рассмотренных графах составило 1309, среднее – 179. Число текущих комбинаций увеличивается при наличии перемычек между параллельными нефтепроводами;

- максимальное время выполнения программы сжатия ГТС и формирования текущих комбинаций для рассмотренных технологических участков составило 7,5 мин.

Список используемых источников

1 ОТТ-35.240.50-КТН-130-13. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Централизованная система противоаварийной автоматики магистральных нефтепроводов (нефтепродуктопроводов). Общие технические требования. М., 2013. 158 с.

2 Белов В. В., Воробьев Е. М., Шаталов В. Е. Теория графов. М. Высшая школа. 1976. 392 с.

3 Калугин Н. А., Калугин А. Н. Элементы теории графов. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет. 2013. 48 с.

4 Элементы теории графов / В. И. Носов, Т. В. Бернштейн, Н. В. Носкова, Т. В. Храмова. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2008. 107 с.

5 Стюарт Рассел, Питер Норвиг Искусственный интеллект: современный подход. М: Вильямс, 2006. 1408 с.

References

1 ОТТ-35.240.50-KTN-130-13. Magistral'nyi truboprovodnyi transport nefiti i nefteproduktov. Centralizovannaya sistema protivovariinoi avtomatiki magistral'nyh nefteprovodov (nefteproduktoprovodov). Obshie tehnicheckie trebovaniya. M., 2013. 158 s. [in Russian].

2 Belov V. V., Vorob'ev E. M., Shatalov V. E. Teoriya grafov. M. Vysshaya shkola. 1976. 392 s. [in Russian].

3 Kalugin N. A., Kalugin A. N. Elementy teorii grafov. Samara: Samarskii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet. 2013. 48 s. [in Russian].

4 Elementy teorii grafov / V. I. Nosov, T. V. Bernshtein, N. V. Noskova, T. V. Hramova. Novosibirsk: Sibirskii gosudarstvennyi universitet telekommunikatsii i informatiki, 2008. 107 s. [in Russian].

5 Styuart Rassel, Piter Norvig Iskusstvennyi intellekt: sovremennyi podhod. M: Vil'yams, 2006. 1408 s. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Бархатов А. Ф., аспирант кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

A. F. Barkhatov, Post-graduate Student of the Chair “Equipment and Welding Technology”, FSBEI NPE National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, the Russian Federation

e-mail: barkhatov-alex@yandex.ru

Вязунов Е. В., канд. техн. наук, г. Москва, Российская Федерация

E. V. Vyazunov, Candidate of Engineering Sciences, Moscow, the Russian Federation

Дрожжинов С. Ф., главный специалист - руководитель группы отдела математического моделирования филиала «Центр проектирования систем автоматизации и связи» АО «Гипротрубопровод», г. Москва, Российская Федерация.

S. F. Drozhzhinov, Chief Specialist of the Mathematical Modeling of “Design Center Automation and Communication” of “Giprotruboprovod”, Moscow, the Russian Federation

Савельев А. В. руководитель группы отдела математического моделирования филиала «Центр проектирования систем автоматизации и связи» АО «Гипротрубопровод», г. Москва, Российская Федерация

A.V. Savelyev Head of Group of the Mathematical Modeling of “Design Center Automation and Communication” of “Giprotruboprovod”, Moscow, the Russian Federation