

Оптимизация, системный анализ и исследование операций

© 2025 г. Г.Г. ГРЕБЕНЮК, д-р техн. наук (gggrebenuk@gmail.com),
А.А. КРЫГИН, канд. техн. наук (andreykr@yandex.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

ТРАЕКТОРНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Рассматривается метод восстановления сетевой распределительной системы, поврежденной в результате неблагоприятного воздействия. Особенностью метода является применение предельных графов к решению задачи восстановления и возможность нахождения различных оптимизационных решений, учитывающих сроки и стоимость работ, дефицит мощности источников, количество переключений коммутаторов и др. Приводится описание метода и операций восстановления с учетом категории потребителя. На примере фрагмента сети выполняется оценка инженерной устойчивости системы распределения электрической энергии. Предложенный подход может использоваться для формирования рекомендаций по повышению устойчивости инфраструктурных систем и для поддержки лица, принимающего решения, в реальных условиях действия неблагоприятных факторов.

Ключевые слова: сетевая инфраструктура, инженерная устойчивость, восстановление.

DOI: 10.31857/S0005231025030074, EDN: IDYDKU

1. Введение

Инженерные сетевые системы относят к критическим инфраструктурам, жизненно важным для экономики любого государства, региона, поселения. На элементы сетевых инфраструктур (воздушные и подземные линии, трубопроводы, трансформаторные и насосные станции, коммутирующие устройства и др.) действуют внутренние и внешние неблагоприятные воздействия (НВ), которые нередко вызывают аварии, выходящие за пределы проектных требований и приводящие к деградации системы вследствие разрушения многочисленных сетевых элементов и массовым отключениям потребителей.

Особенно значительными являются последствия от внешних климатических воздействий, количество и интенсивность которых в связи с изменением климата существенно возрасла в последние годы. Предположение о стационарности климата, на основе которого проектировались инженерные системы, становится не очевидным [1]. Это означает, что ущерб от таких НВ, как наводнения, ураганы, землетрясения и др., будет только возрастать [2].

Внешние воздействия часто рассматриваются как локальные атаки. Их можно разделить на атаки с неподвижным и подвижным центрами воздействия. В первом случае, например в случае землетрясения, интенсивность воздействия уменьшается по мере удаления от неподвижного центра [3], во втором – интенсивность уменьшается по мере удаления от траектории движения центра [4]. Так, зона действия урагана определяется полосой его движения: центральной координатой, направлением, длиной и шириной. По мере удаления от центра снижается интенсивность и уменьшаются последствия от воздействия.

В силу пространственного расположения инженерных сетей, независимо от вида атаки, повреждения всегда сосредоточены в определенной географической области. Поэтому при моделировании воздействий на пространственные сети для отражения географического расположения сетевых элементов удобно использовать двумерные решетки [5].

Сетевые инфраструктуры, являясь дорогостоящими системами длительного действия, нуждаются в защите от НВ. С этой целью на этапе эксплуатации осуществляются организационные (подготовка персонала и техники) и технические мероприятия (повышение надежности оборудования, его обновление и др.) по предотвращению масштабных повреждений. Для проверки уровня готовности систем к прогнозируемым НВ разрабатываются модели таких воздействий и стратегии восстановления.

Выбранная стратегия оказывает большое влияние на устойчивость инженерной системы – наиболее важного свойства, характеризующего способность инфраструктурной системы обеспечивать установленные технико-экономические показатели эксплуатации в условиях воздействия дестабилизирующих факторов и допускать восстановление работоспособности за приемлемое время [6]. Близкие к этому определения инженерной устойчивости приведены в [7].

Для количественной оценки инженерной устойчивости, как правило, используются показатели, основанные на производительности и соответствующие им кривые ее изменения при НВ, которые в работах по исследованию устойчивости инфраструктурных систем часто называют кривыми устойчивости [3].

Этими показателями в зависимости от области применения могут быть: расход жидкости, объем услуг, недопоставленных системой, совокупная функциональность системы и др.

Существует несколько подходов к формированию стратегии восстановления инфраструктуры, которые учитывают свойства сети, порядок восстановления, выделенные время, ресурсы и др. Так, в [8] приоритетные для восстановления компоненты определяются с использованием многокритериальной модели оптимизации показателя устойчивости и времени восстановления методом смешанно-целочисленного программирования. В [9] для повышения устойчивости взаимозависимых водопроводных, газовых и электриче-

ских сетей при НВ предлагается модель оптимизации, также использующая смешанно-целочисленное программирование.

В [3] в рамках решетчатой структуры рассмотрены три широко применяемые стратегии: восстановление от периферии (PR), восстановление на основе веса узла (PRNW) и локализованное восстановление (LR). Вес узла, как правило, связывается со значимостью подключенных к нему потребителей (больницы, заводы, школы и др.), которых этот узел обеспечивает ресурсом.

Согласно стратегии PR восстановление начинается с выбора изолированного узла с наибольшим весом, соседнего с функциональным узлом, т.е. с узлом, получающим ресурс, и ремонта связывающей их линии. Так как соседних функциональных узлов в решетке может быть больше одного, то выбор линий для восстановления происходит случайным образом. После того, как на текущем шаге все изолированные узлы одного веса оказались подключенными, на следующем шаге выбирается другой изолированный узел с наибольшим весом, соседний с функциональным узлом сети и выполняется ремонт связывающей их линии и т.д. В стратегии PRNW преимущество в восстановлении отдается линиям, которые связывают, в первую очередь, изолированный узел с наибольшим весом с функциональным узлом сети и связям этого узла с другими значимыми узлами. Выбор поврежденных линий, инцидентных функциональному узлу, также происходит случайным образом. В стратегии LR восстановление начинается с выбора корневого узла и исправления его поврежденных связей. Связи остальных узлов восстанавливаются в порядке удаления этих узлов от корневого узла, независимо от их веса. В этих стратегиях используется постепенное пошаговое восстановление линий и снабжение инцидентных им ранее изолированных узлов.

Недостатками стратегий, использующих оптимизацию, являются сложность построения модели с большим числом ограничений и длительность вычислений. К недостаткам последних трех стратегий относятся: случайный выбор восстанавливаемых линий, что создает множественность траекторий ремонта; возможность подключения узлов с наибольшим весом в конце процесса восстановления (PR, LR). Рассмотрение только линий в качестве повреждений создает упрощенную картину воздействия.

Реальная картина поражения отличается от описанной выше. Так, даже при большой интенсивности воздействия часть воздушных линий может не повреждаться, например, если они расположены по направлению ветра; часть узлов, например подстанций, могут разрушаться в силу недостаточной стойкости сооружения; внутри зоны поражения могут существовать изолированные «островки» неповрежденных сетевых элементов, которые должны учитываться в процессе восстановления и т.д. Поэтому реальная инфраструктура после воздействия представляется в виде мозаики из оставшихся исправными и поврежденными сетевых элементов. Сами поврежденные элементы входят в состав сечений, нарушающих достижимость узлов, не затронутых атакой, до источников ресурса.

Непрерывная подача электроэнергии после природных и техногенных катастроф не может быть обеспечена без приоритизации нагрузок и ресурсов [10]. Поэтому при разработке стратегии необходимо определить состав элементов, подлежащих ремонту, и очередность (порядок) устранения повреждений с учетом приоритетов потребителей, оставшихся без ресурсов.

Например, в первую очередь должно выполняться восстановление тех элементов, которые обеспечивают ресурсами более значимых потребителей (потребителей первой категории). В других случаях восстановление должно проходить так, чтобы ресурсы предоставлялись всем потребителям, но при ограниченных объемах поставок и т.д. В зависимости от приоритетов формируются пути снабжения ресурсами и состав ремонтируемых элементов. Ясно, что эти пути могут не повторять те, которые существовали до кризиса.

Выбираемый состав ремонтируемых элементов и очередность устранения повреждений должны удовлетворять определенным критериям и учитывать наличие ограничений в ресурсах: финансовых, материальных (механизмов) и людских (ремонтных бригад). Чаще всего в качестве критериев используются стоимость и сроки выполнения работ, тогда остальные располагаемые ресурсы в задаче оптимизации выступают как ограничения.

Ниже предлагается подход к восстановлению элементов инфраструктурной сети (узлов и линий) на основе реальной картины повреждений, который смягчает недостатки указанных выше стратегий.

В качестве инфраструктурной системы рассматривается электрическая распределительная сеть. Такая сеть, как правило, характеризуется разомкнутой структурой, в которой каждый потребитель получает ресурс от одного источника. При этом один источник может обеспечивать ресурсом нескольких потребителей.

Для исследования сетей, обладающих указанными свойствами, в [11] введено понятие «предельного» графа. В [12, 13] разработаны алгоритмы построения полного множества предельных графов, доказаны теоремы, обосновывающие корректность алгоритмов, и рассмотрено применение метода к решению задач реконфигурации распределительных сетей. В представленной статье результаты указанных работ распространяются на решение задачи восстановления сетевой инфраструктуры после НВ.

Рассматриваемый ниже траекторный метод восстановления можно представить в виде последовательности шагов:

- поиск путей между отключенными потребителями и источниками ресурса,
- определение на этих путях минимальных наборов поврежденных элементов (узлов и связей),

- выбор среди полученных наборов тех, для восстановления элементов которых требуется минимальное время или стоимость,
- оценка инженерной устойчивости.

Эти шаги подробно рассмотрены в примере раздела 4. Для детерминированной оценки устойчивости выбран интегральный показатель производительности, который хорошо отражает общее состояние системы в различных режимах, включая период восстановления после НВ [14].

2. Постановка задачи

Процесс восстановления рассматривается на модели распределительной сети, представляющей собой связный граф $G = \langle V, E \rangle$, где V и E – соответственно конечные множества вершин (узлов сети) и ребер (связей сети). В свою очередь, множество вершин графа можно представить как $V = \langle S, P, U \rangle$, где S, P, U – соответственно подмножества вершин генерации ресурса (источники), потребления (нагрузки), преобразования (подстанции) и распределения ресурса (распределительные устройства). Узлы потребления подключены к узлам преобразования ресурса.

В дальнейшем будем предполагать, что все связи множества E являются коммутируемыми и расположенные на них коммутаторы могут находиться в двух состояниях: «замкнутое», когда ресурс проходит через связь, и «разомкнутое», когда ресурс не проходит через нее. В соответствии с состоянием коммутаторов можно говорить о замкнутом или разомкнутом состоянии ребер.

От состояния коммутаторов зависят режимы работы сети, управление которыми используется для изменения конфигурации сети и, как правило, осуществляется по критериям минимизации потерь мощности в линиях, выравнивания нагрузок в линиях и др.

Таким образом, маршруты распределения ресурса определяются наборами состояний коммутаторов. Каждому набору свойственно определенное направление потоков в сети и соответствующая ему ориентация ребер графа. В силу использования при управлении режимами различных наборов состояний возможно изменение ориентации ребер. По этой причине в статье используется терминология, принятая для неориентированных графов.

Возникает вопрос, как резервирование связей в распределительных сетях отражается на наборах состояний коммутаторов, например, при ненагруженном («холодном») и нагруженном («горячем») резервах. При ненагруженном резерве каждая из связей содержит коммутаторы в различных состояниях, которые естественным образом входят в наборы. При нагруженном резерве коммутаторы резервируемых связей должны находиться в состоянии «замкнуто». В этом случае рекомендуется перейти к эквивалентной схеме, где параллельные связи объединяются в одну с общим потоком ресурса и единым коммутатором.

Для выделения среди наборов состояний тех, которые присущи распределительной сети, используем введенное в [13] определение графа «конфигурации».

Для любого подмножества ребер $W \subseteq G$ определим следующую операцию:

- 1) удалим из графа G подмножество W ;
- 2) удалим из графа G все ребра и вершины, не лежащие ни на одном пути $s \rightarrow p$, где $s \in S$, $p \in P$.

Назовем описанную операцию построением «разрешенного» подграфа.

Удаляемой вершиной может быть и вершина-источник $s \in S$, если для нее нет ни одного пути $s \rightarrow p$ для любого $p \in P$.

Таким образом, рассмотрению подлежит подграф G , содержащий пути $s \rightarrow p$, где $s \in S$, $p \in P$, не включающие ребер в разомкнутом состоянии.

Получившийся в результате этой операции разрешенный подграф будем называть графом конфигурации τ_r , если для каждой вершины $p \in P$ существует путь $s \rightarrow p$ хотя бы из одной вершины $s \in S$.

Граф конфигурации будем называть предельным графом τ_r^{lim} , если при удалении из него любого ребра $e \in E \setminus W$ найдется вершина $p \in P$, для которой не будет ни одного пути $s \rightarrow p$, где $s \in S$.

В [10] показано, что каждый предельный граф τ_r^{lim} обладает следующими свойствами:

- 1) Для вершины из P не существует двух путей, ведущих от различных вершин из S ;
- 2) τ_r^{lim} не содержит циклов, направления ребер определяются однозначно по путям $S \rightarrow P$.

Свойства 1 и 2 характерны для распределительных сетей.

После наступления НВ множество вершин U разделяется на два подмножества: подмножество вершин, отключенных от источников \tilde{U} , и подмножество вершин, оставшихся подключенными к источникам, далее называемых функциональными вершинами \bar{U} .

В то же время $\tilde{U} = \tilde{U}^* \cup \tilde{U}^0$, где \tilde{U}^* – подмножество вершин, физически поврежденных, \tilde{U}^0 – подмножество вершин, изолированных от источников поврежденными вершинами и ребрами.

Множество ребер E также разделится на подмножество ребер, отключенных от источников \tilde{E} , и подмножество ребер, оставшихся подключенными к источникам, далее называемых функциональными ребрами \bar{E} .

В то же время $\tilde{E} = \tilde{E}^* \cup \tilde{E}^0$, где \tilde{E}^* – подмножество ребер, физически поврежденных, \tilde{E}^0 – подмножество ребер, изолированных от источников поврежденными вершинами и ребрами.

Изоляция или повреждение узла означает отключение от ресурса присоединенного к этому узлу потребителя из подмножества \tilde{P} , $\tilde{P} \subseteq P$.

Таким образом, в результате НВ имеем следующие подмножества элементов сети: физически поврежденные ребра \tilde{E}^* и вершины \tilde{U}^* , оставшиеся функциональными ребра \bar{E} и вершины \bar{U} , исправные, изолированные ребра \tilde{E}^0 и вершины \tilde{U}^0 .

После анализа измененной в результате НВ структуры сети постановка задачи представляется в следующем виде. На графе $G = \langle V, E \rangle$, часть вершин и ребер которого находятся в поврежденном состоянии, вследствие чего вершины-потребители множества \tilde{P} не получают ресурсы, требуется найти такие пути $S \rightarrow \tilde{P}$, которые содержат минимальные по мощности наборы поврежденных вершин и ребер, восстановление которых обеспечивает ресурсами отключенных потребителей множества \tilde{P} .

При определенных условиях указанные минимальные наборы обеспечивают восстановление за минимальное время или стоимость. Вершины и ребра этих наборов обладают наивысшим приоритетом восстановления.

В [13] показано, что полное множество предельных графов соответствует полному множеству вариантов присоединений потребителей к источникам. Поэтому существует предельный граф, содержащий искомое множество путей. В той же работе исследованы методы нахождения полного множества предельных графов – методы простых комбинаций путей и компонентный метод. Поэтому далее предполагается, что множество предельных графов τ_r^{lim} определено.

Далее рассмотрим подмножество поврежденных вершин \tilde{U}^* и ребер \tilde{E}^* и определим те из них, которые подлежат первоочередному ремонту для восстановления снабжения потребителей из \tilde{P} .

3. Предельные графы в задаче восстановления

Как и в стратегиях, рассмотренных во введении, примем, что восстановление поврежденного элемента сети (узла или связи) происходит после его ремонта и присоединения к узлу подмножества \bar{U} , т.е. к узлу, функциональность которого не нарушилась из-за НВ.

Пусть τ_r^{lim} – полное множество предельных графов графа G . Тогда те подмножества вершин \tilde{U}^* и ребер \tilde{E}^* , которые принадлежат предельному графу $\tilde{\tau}_{r0}^{lim}$, будут обладать более высоким приоритетом восстановления по сравнению с остальными поврежденными элементами.

На множестве вершин \bar{U} рассмотрим подмножество граничных вершин \bar{U}_s .

Вершина \bar{u} множества \bar{U} , расположенная на пути $s \rightarrow \tilde{p}$, где $s \in S$, называется граничной для этого пути, если все вершины и ребра между \bar{u} и \tilde{p} принадлежат соответственно множествам \tilde{U} и \tilde{E} , т.е. есть граничная вершина – это ближайшая к отключенному потребителю функциональная вершина.

Построим подграф \tilde{G} графа сети G , в котором в качестве вершин источников рассматриваются вершины множества \bar{U}_s , в качестве вершин потребителей – множества \tilde{P} . Добавим к этому подграфу вершины множества \tilde{U} и ребра множества \tilde{E} . После чего удалим все вершины и ребра, не лежащие на путях $s \rightarrow \tilde{p}$, где $s \in \bar{U}_s$, $\tilde{p} \in \tilde{P}$.

Обозначим через $\tilde{\tau}_r^{lim}$ полное множество предельных графов для графа \tilde{G} и напомним, что τ_r^{lim} – полное множество предельных графов для графа G .

При использовании компонентного метода [13] одновременно с построением множества предельных графов $\tilde{\tau}_r^{lim}$ определяются граничные функциональные вершины множества \overline{U}_s .

Сложность вычислений вариантов восстановления значительно сокращается при использовании предельных графов $\tilde{\tau}_r^{lim}$ вместо τ_r^{lim} . Это происходит из-за рассмотрения вершин множества \overline{U}_s в качестве источников для потребителей $\tilde{p} \in \tilde{P}$. Вследствие этого множество $\tilde{\tau}_r^{lim}$ определяется на существенно меньшем числе вершин по сравнению с множеством τ_r^{lim} .

Обозначим через $\tilde{\tau}_{r0}^{lim}$ граф, принадлежащий множеству $\tilde{\tau}_r^{lim}$ и содержащий наименьшее количество поврежденных элементов: вершин из \tilde{U}^* и ребер из \tilde{E}^* .

Тогда справедливо

Утверждение 1. Приоритет в восстановлении поврежденных вершин и ребер принадлежит вершинам \tilde{u}^ , $\tilde{u}^* \in \tilde{U}^*$ и ребрам \tilde{e} , $\tilde{e} \in \tilde{E}$, входящим в $\tilde{\tau}_{r0}^{lim}$.*

Это нетрудно доказать. Полное множество предельных графов τ_r^{lim} соответствует всем допустимым вариантам присоединения вершин P к вершинам S , включая все допустимые варианты присоединения вершин \tilde{P} к вершинам S , т.к. $\tilde{P} \subseteq P$. В τ_r^{lim} все пути $S \rightarrow \tilde{P}$ проходят через вершины \overline{U}_s и, следовательно, пути $\overline{U}_s \rightarrow \tilde{P}$ проходят через вершины множества \tilde{U} и ребра множества \tilde{E} , находящиеся в \tilde{G} . Тогда подграфы предельных графов τ_r^{lim} , состоящие из путей $\overline{U}_s \rightarrow \tilde{P}$, образуют полное множество предельных графов $\tilde{\tau}_r^{lim}$.

Эти графы $\tilde{\tau}_r^{lim}$ соответствуют всем допустимым вариантам присоединения вершин \tilde{P} к вершинам \overline{U}_s , а следовательно, соответствуют всем возможным вариантам восстановления электроснабжения потребителей \tilde{p} , $\tilde{p} \in \tilde{P}$ из вершин \overline{U}_s и, стало быть, из источников s , $s \in S$.

Понятно, что при восстановлении вершин \tilde{u}^* , $\tilde{u}^* \in \tilde{U}^*$ и \tilde{e}^* , $\tilde{e}^* \in \tilde{E}^*$, входящих в $\tilde{\tau}_{r0}^{lim}$, восстановление снабжения потребителей произойдет с минимальными сроком и стоимостью выполнения работ (при сделанных выше допущениях).

Предельные графы в $\tilde{\tau}_r^{lim}$ далее будем называть графами восстановления.

4. Применение метода к восстановлению поврежденной сети

Восстановление в предложенном методе осуществляется в соответствии со следующими этапами:

- 1) Выбор потребителей заданной категории.
- 2) Построение подграфа \tilde{G} .
- 3) Построение множества предельных графов $\tilde{\tau}_r^{lim}$ (графов восстановления).
- 4) Выбор сетевых элементов – кандидатов на восстановление и оценка инженерной устойчивости сетевой инфраструктуры.

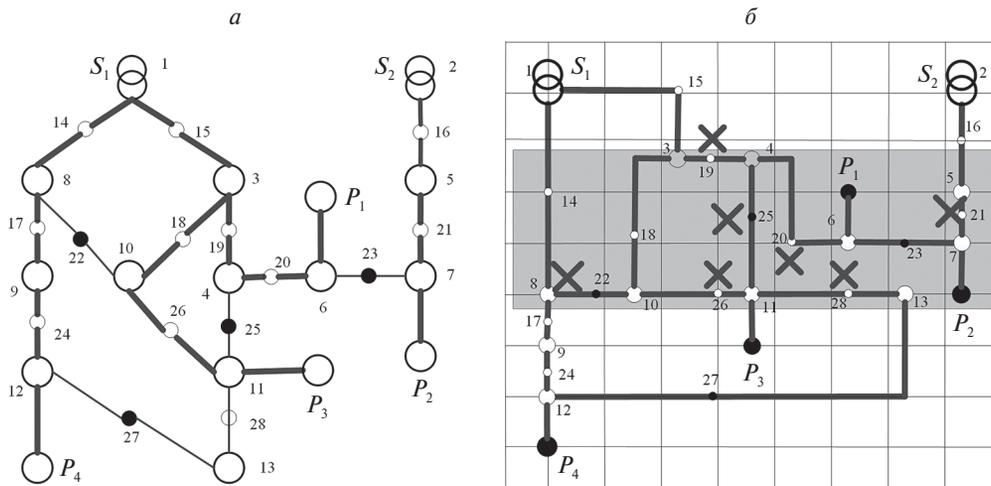


Рис. 1. Снабжение потребителей P_1 – P_4 от источников S_1 и S_2 :
 а – граф сетевой системы; б – расположение сетевой системы в географической зоне.

Этапы 1–4 повторяются для потребителей более низких категорий (при их наличии).

Этапы 1–3 рассмотрены выше, и поэтому далее принимается, что множество графов восстановления построено. Рассмотрим более подробно этап 4 на примере сети рис. 1, а.

На рис. 1, а приведен пример графа распределительной сети. «Жирными» линиями выделена схема снабжения подстанций, принятая для нормального режима эксплуатации (далее «нормальная» схема).

В составе графа сети имеются две вершины – источники S_1 и S_2 , которыми могут быть центры питания, 11 функциональных узлов 3–13, которым соответствуют подстанции сети, 15 линий сети 14–28. К каждой подстанции присоединена нагрузка, определяющая текущую производительность подстанции. Четыре из них P_1 – P_4 изображены на рис. 1. «Жирными» линиями обозначена схема снабжения подстанций, принятая для нормального режима эксплуатации. Маленькие кружки – ребра, которые соответствуют участкам воздушных линий и одновременно устройствам коммутации. Большие кружки соответствуют вершинам, т.е. подстанциям сети. Состояние «разомкнуто» устройств коммутации на рис. 1 представлено темным кружком, состояние «замкнуто» – белым. На рис. 1, б изображено расположение сетевых элементов на двумерной решетке. Зона действия негативного события (например, урагана) представлена в виде затененной полосы. Множество поврежденных в результате этого события элементов сетевой системы отмечены крестиками. «Нормальной» схеме рис. 1, а соответствует предельный граф τ_r^{lim} .

Для примера рис. 1 введем следующие допущения, которые не влияют на предлагаемый подход к решению задачи восстановления:

- все подстанции до НВ имели одинаковую производительность (далее равную 1 у.е.),
- стоимость ремонта любого сетевого элемента одинаковая,
- ремонт выполняется последовательно одной бригадой из расчета один сетевой элемент в единицу условного времени,
- временем на выполнение переключений в устройствах коммутации можно пренебречь по сравнению с временем ремонта сетевого элемента.

Обозначим через $\tilde{\tau}_{r0}^{lim}$ граф, содержащий наименьшее количество вершин из \tilde{U}^* и \tilde{E}^* . При сделанных выше допущениях восстановление поврежденных вершин и ребер, входящих в $\tilde{\tau}_{r0}^{lim}$, приведет к восстановлению снабжения потребителей в минимальные сроки и с минимальной стоимостью выполнения работ.

По этой причине граф $\tilde{\tau}_{r0}^{lim}$ является искомым и его вершины множества \tilde{U}^* и ребра множества \tilde{E}^* обладают наивысшим приоритетом восстановления.

4.1. Выбор сетевых элементов – кандидатов на восстановление

Данный этап включает выбор набора сетевых элементов из состава поврежденных элементов, оптимального для восстановления.

Рассмотрим этап 4 на примере распределительной сети рис. 1. Множества физически поврежденных узлов $\tilde{U}^* = \{8\}$, ребер $\tilde{E}^* = \{19, 20, 21, 25, 26, 28\}$. Множество изолированных узловых вершин $\tilde{U}^0 = \{4, 6, 7, 9, 11, 12, 13\}$ и ребер $\tilde{E}^0 = \{17, 23, 24, 27\}$. Граничными вершинами являются $\tilde{U}_s = \{1, 3, 5, 10\}$.

Для наглядности изложения ограничимся восстановлением функциональности четырех узлов, снабжающих потребителей $\tilde{P}_1 - \tilde{P}_4$, что не влияет на общность подхода. Пусть среди них потребители \tilde{P}_1, \tilde{P}_2 относятся к первой и \tilde{P}_3, \tilde{P}_4 ко второй категориям.

Электроснабжение указанных потребителей происходит в соответствии с [15], а именно, потребители первой категории (опасные производства, больницы и др.) обеспечиваются электроснабжением не менее чем от двух независимых источников питания по независимым линиям, второй категории (поликлиники, школы и др.) – от двух независимых источников по независимым линиям, третьей категории (жилые дома и др.) обеспечиваются электроснабжением от одного источника. Будем считать возобновление снабжения потребителей первой категории приоритетной задачей.

Восстановление снабжения потребителей первой категории. При сделанных допущениях минимальная стоимость восстановления C достигается в графе \tilde{G} с минимальной мощностью множества $\tilde{U}^* \cup \tilde{E}^*$.

В качестве примера рассмотрим два предельных графа для потребителей первой категории \tilde{P}_1, \tilde{P}_2 .

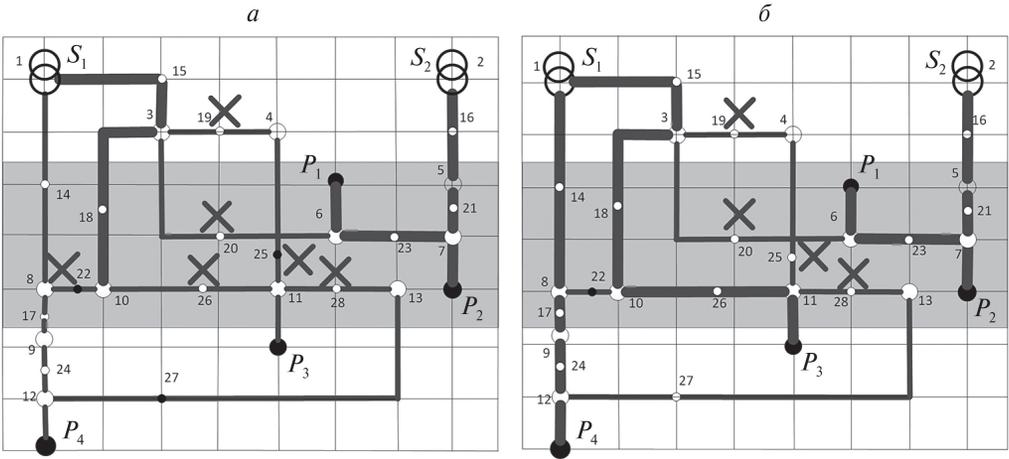


Рис. 2. Восстановление снабжения: *a* – потребителей первой категории $\widetilde{P}_1, \widetilde{P}_2$; *б* – потребителей второй категории $\widetilde{P}_3, \widetilde{P}_4$.

В обозначениях вершин и ребер в табл. 1 опустим знаки «тильда» и верхнего подчеркивания, в остальном они совпадают с обозначением содержащих их множеств: функциональных вершин \overline{U} , поврежденных вершин \widetilde{U}^* и ребер \widetilde{E}^* , изолированных вершин \widetilde{U}^0 и ребер \widetilde{E}^0 .

Таблица 1. Примеры графов восстановления снабжения потребителей первой категории

№ вар.	Граничные узлы \overline{U}_s	Графы восстановления
1	5	$5, 21^*, 7^0, 23^0, 6^0, P_1; 5, 21^*, 7^0, P_2$
2	3, 5	$3, 19^*, 4^0, 20^*, 6^0, P_1; 5, 21^*, 7^0, P_2$

На рис. 2, *a* «толстыми» линиями обозначены пути подвода энергии к функциональным узлам 3, 10, а также граф восстановления $\widetilde{\tau}_{r0}^{lim}$, построенный по варианту 1 табл. 1, который имеет меньшее число «поврежденных» ребер 21^* по сравнению с вариантом 2 ($19^*, 20^*, 21^*$). «Исправная» вершина 23^0 в нормальной схеме соответствует коммутатору, который находится в состоянии «разомкнуто». Вариант 1 предполагает восстановление поврежденной линии 21^* в качестве ремонта первой очереди и перевод коммутатора 23^0 в состояние «замкнуто».

Восстановление снабжения потребителей более низкой категории. Будем считать, что возобновление снабжения потребителей первой категории выполнено по варианту 1 табл. 1. В качестве примера рассмотрим два графа восстановления для потребителей второй категории $\widetilde{P}_3, \widetilde{P}_4$. После восстановления части сети для снабжения потребителей первой категории поврежденный фрагмент сети изменяется и выбор восстанавливаемых элементов рассматривается на соответствующем этим изменениям подграфе \widetilde{G} .

Таблица 2. Примеры графов восстановления снабжения потребителей второй категории

№ вар.	Граничные узлы \bar{U}_s	Графы восстановления
1	10	$10, 26^*, 11^0, P_3; 10, 26^*, 11^0, 28^*, 13^0, 27^0, 12^0, P_4$
2	1, 10	$10, 26^*, 11^0, P_3; 1, 14^0, 8^*, 17^0, 9^0, 24^0, 12^0, P_4$

Для восстановления снабжения $\widetilde{P}_3, \widetilde{P}_4$ в варианте 1 табл. 2 требуется провести ремонт линий $26^*, 28^*$ и выполнить переключение в устройстве 27^0 .

Вариант 2 табл. 2 определяется графом восстановления, в состав которого входят поврежденные подстанция 8^* и линия 26^* . Этот вариант выбирается для проведения ремонта второй очереди \widetilde{r}_{r0}^{lim} . Он изображен на рис. 2,б в виде «толстых» линий распределения электроэнергетики.

Предпочтительный вариант при одинаковом числе повреждений выбирается лицом, принимающим решения, с учетом числа разблокированных (ранее изолированных) узлов, снабжения потребителей от разных источников, числа переключений [10] и др.

Оценка инженерной устойчивости. Оценка инженерной устойчивости для примера сети рис. 1 выполняется после построения графика изменения ее производительности при НВ. Для иллюстрации подхода к оценке устойчивости пренебрежем потерей мощности в линиях и будем учитывать только изменение мощности в узлах сети (подстанциях). Также предположим, что деградация происходит мгновенно.

Всего поврежденными и изолированными в результате негативного события оказались 8 узлов (4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13), что эквивалентно потере производительности сети 8 у.е. В результате НВ шесть линий 19, 20, 21, 25, 26, 28 и одна подстанция 8 (рис. 1,б) оказались поврежденными. По этой причине к сети остались подключенными только потребители трех подстанций 3, 5, 10, которые имеют суммарную производительность 3 у.е.

Рассмотрим распределение мощностей подстанций для выбранного варианта восстановления. После ремонта линии 21 и присоединения подстанции 7 производительность сети повысится до 4 у.е. После переключения коммутатора 23 в состояние «замкнуто» подстанция 6 присоединяется к сети источника S_2 , и производительность сети повысится до 5 у.е. В конце второй очереди ремонта к источнику S_1 будут присоединены четыре из ранее отключенных подстанций 8, 9, 11, 12, и производительность сети повысится до 9 у.е. После переключения коммутатора 27 в состояние «замкнуто» подстанция 13 присоединяется к сети источника S_1 , и производительность сети повысится до 10 у.е.

Процесс восстановления для выбранных из табл. 1 и 2 вариантов ремонта можно представить в виде графика рис. 3.

На графике горизонтальные отрезки соответствуют восстанавливаемым участкам сети и подстанциям, их обозначения находятся над этими линиями. Вертикальные отрезки обозначают изменение производительности за счет

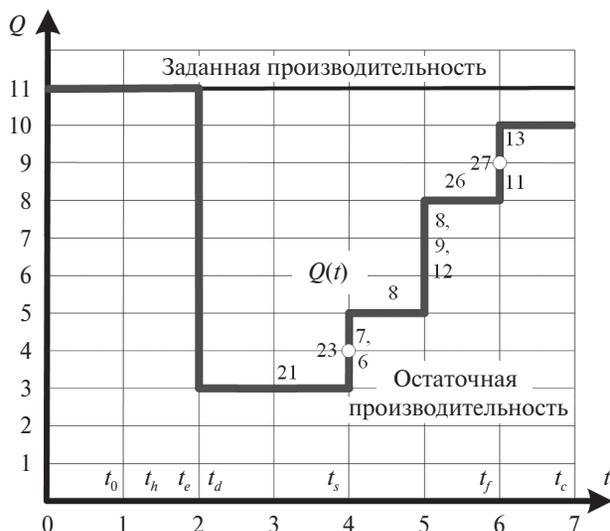


Рис. 3. График восстановления сети, изображенной на рис. 1.

подключения подстанций к функциональной части сети, справа от этих отрезков указаны номера подстанций. Кружками на графике показаны узлы коммутации, состояние которых изменяется переключением с положения «разомкнуто» на «замкнуто».

Значения t_h, t_e, t_d, t_s, t_f определяют границы между различными фазами процесса: начала подготовки к НВ; поглощения воздействий из-за начального и последующих отказов за счет внутренних свойств системы, например резервирования; завершения действия отказов и начала фазы оценки ущерба и разработки мероприятий по восстановлению; перехода к восстановлению; завершения восстановления системы. В силу предположения о мгновенной деградации $t_e = t_d$.

В фазе завершения восстановления достигнутая производительность может не соответствовать ее докризисному значению. Остаточная производительность определяется ее минимальным уровнем на контрольном интервале $[t_0, t_c]$.

Доля площади, ограниченной функцией $Q(t)$ на контрольном интервале $[t_0, t_c]$ рис. 3 относительно заданной производительности на этом интервале, применяется для оценки инженерной устойчивости системы. Эта доля, вычисленная для графика рис. 3 и контрольного интервала измерения $[1, 7]$, равна 0,61.

Выбор характерных моментов времени, определяющих изменения в поведении системы, нуждается в пояснении. В настоящее время отсутствуют устоявшиеся формулировки для определения приведенных выше временных границ фаз и контрольного интервала. В то же время на большом интервале контроля, значительно превышающем время завершения полного восстановления, производительность может быть близкой к заданной и отношение пло-

падей может стремиться к единице. Этот факт указывает на зависимость полученной интегральной оценки устойчивости от выбора значений t_0, t_c . В литературе приводятся рекомендации по их выбору, как правило, зависящие от приложения. Так, для установления значения t_c используются: ожидаемое, среднее, максимальное времена восстановления; соображения заинтересованных сторон по конкретному сценарию; среднее время между неблагоприятными событиями.

Интегральная производительность системы J оценивается как

$$(1) \quad J = \int_{t_0}^{t_c} Q(t) dt.$$

В [14] исследованы различные показатели и формы кривой устойчивости. Среди широко используемых для детерминированной оценки эффективности восстановления применяется нормированный показатель интегральной производительности (1), отнесенной к контрольному интервалу выполнения оценки $[t_0, t_c]$

$$(2) \quad \Phi = \frac{\int_{t_0}^{t_c} q(t) dt}{t_c - t_0}.$$

В (2) $q(t)$ означает производительность, нормированную по ее заданному значению.

Затраты на восстановление C равны $C = rT$, где r – затраты в единицу времени.

Если значение показателя Φ не отвечает заданному, то необходимо пересмотреть варианты или изменить ограничения на количество ремонтных бригад, технических средств и др.

При реализации описанной стратегии конфигурация распределительной сети претерпела изменения по сравнению со схемой снабжения в докризисной ситуации (рис. 1,а). Поэтому на следующей стадии восстановления при наличии финансовых и технических средств можно реконфигурировать сеть, подняв ее производительность до 100% способом, аналогичным описанному выше, изменив состояния коммутаторов и выполнив ремонт оставшихся поврежденными сетевых элементов.

После выбора варианта восстановления следует проверять значения потоков в линиях и напряжений на шинах, чтобы предотвратить превышения ими допустимых значений. Для этого используются методы математического моделирования потокораспределений в электрических сетях.

5. Заключение

Предложен подход к восстановлению сетевой инфраструктуры, поврежденной в результате неблагоприятного воздействия. Особенностью подхода

является применение метода предельных графов, ранее разработанного для решения задач реконфигурации сетей, к восстановлению поврежденной сети. Полный набор предельных графов, получаемый при использовании данного метода, позволяет находить различные оптимизационные решения для выполнения восстановления, учитывающие сроки и стоимость работ, дефицит мощности источников, пропускную способность линий, количество переключений коммутаторов и др.

Затраты времени на расчет предельных графов в задаче восстановления сокращаются в связи с возможностью рассмотрения только части сети, ограниченной зоной неблагоприятного воздействия. Каждое решение должно проверяться математическим моделированием процессов потокораспределения.

Создание системы, устойчивой к чрезвычайным неблагоприятным воздействиям, предполагает наличие организационных механизмов и технических средств для ее восстановления. Предложенный метод может использоваться для оценки эффективности имеющихся у организации средств восстановления путем имитации вероятных неблагоприятных воздействий. На основе оценки устойчивости могут формироваться рекомендации по повышению мер противодействия неблагоприятным факторам. В то же время данный метод направлен на поддержку ЛПР в реальных условиях действия негативных событий.

Далеко не все возможности применения метода предельных графов к восстановлению поврежденной сети рассмотрены в статье, в частности, нуждаются в проведении исследований вопросы восстановления поврежденной инфраструктуры с учетом перегрузок линий, дефицита мощности у потребителей, применимость метода к взаимодействующим инфраструктурным сетям и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Reid R.* How to make infrastructure more resilient against climate change // ASCE. 2022. No. 1. P.1133–1143.
2. *Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Loveck T.* Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements // Int. J. Critical Infrastruct. Protect. 2019. No. 25. P. 125–138.
3. *Afrin T., Yodo N.* Resilience-Based Recovery Assessments of Networked Infrastructure Systems under Localized Attacks // Infrastructures. 2019. V. 4. No. 1. P. 1–18.
4. *Masoomi H., Lindt J., Peek L.* Quantifying Socioeconomic Impact of a Tornado by Estimating Population Outmigration as a Resilience Metric at the Community Level // Struct. Engin. 2018. V. 144. No. 5. P. 18–34.
5. *Barthelemy M.* Spatial Networks // Physics Reports. 2011. V. 499. No. 1–3. P. 1–101.
6. *Гребенюк Г.Г., Лубков Н.В.* Надежный подход к анализу устойчивости инженерной инфраструктуры // Управление большими системами. 2022. № 99. С. 157–181.

7. *Sathurshan M., Saja A., Thamboo J., Haragucht M., Navaratnam S.* Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review of Measurement Frameworks // *Infrastructures*. 2022. V. 7. No. 67. P. 1–26.
8. *Yasser A., Andres D., Gonzalez R., Kash B.* Exploring Recovery Strategies for Optimal Interdependent Infrastructure Network // *Resilience Networks and Spatial Economics*. 2021. V. 21. P. 229–260.
9. *Almoghathawia Y., Barkera K., Emmanuel J.* Resilience-Based Measures for Importance Ranking of Interdependent Infrastructure Networks Components Across Uncertain Disruption Scenarios // *Safety, Reliability, Risk, Resilience and Sustainability of Structures and Infrastructure 12th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability*. 2017. P. 1133–1142.
10. *Arghandeh R., Meier A., Mehrmanesh L., Mili L.* On the definition of cyber-physical resilience in power systems.
https://escholarship.org/content/qt0dr6p7wc/qt0dr6p7wc_noSplash_5a28962764c2b1bf9bf5f0b6b8cf7743.pdf
11. *Гребенюк Г.Г., Крыгин А.А.* Алгоритмы оптимизации числа переключений при реконфигурации сетей теплоснабжения // *АиТ*. 2007. № 12. С. 101–112.
Grebenyuk G., Krygin A. Algorithms for Optimization of the Number of Switchings in Heat Supply Networks Reconfiguration // *Autom. Remote Control*. 2007. V. 68. No. 12. P. 2187–2197.
12. *Гребенюк Г.Г., Крыгин А.А.* Предельные графы в структурной оптимизации режимов распределительных сетей // *АиТ*. 2015. № 1. С. 147–162.
Grebenyuk G., Krygin A. Limit graphs in structural optimization of modes in distribution networks // *Autom. Remote Control*. 2015. V. 76. No. 1. P. 120–132.
13. *Гребенюк Г.Г., Крыгин А.А.* Методы поиска конфигураций распределительных сетей // *АиТ*. 2021. № 5. С. 35–44.
Grebenyuk G., Krygin A. Methods to Search for Configurations of Distribution Networks // *Autom. Remote Control*. 2021. V. 82. No. 5. P. 772–779.
14. *Poulin C., Kane M.* Infrastructure resilience curves: Performance measures and summary metrics // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. V. 216. No. 12.
15. Правила устройства электроустановок. Эксмо, 2023, 512 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.Ф. Караваем.

Поступила в редакцию 07.11.2023

После доработки 10.12.2024

Принята к публикации 14.01.2025