

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ СЕТЕЙ ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕВЫХ СИСТЕМ

В результате анализа свойств и особенностей существующих и проектируемых магистральных сетей (МС), проведенного в соответствии с [1, 2], можно выделить основные условия и ограничения, свойственные объектам такого класса. Ниже перечислены наиболее существенные из них.

1. Каждая выходная вершина  $x \in V_0''$  графа  $G_0$  МС  $N_0$  одновременно является входной вершиной  $x \in V_i'$  графа  $G_i$  какой-либо распределительной сети (РС)  $N_i$ ,  $i \in I$ , и никаких других вершин граф  $G_0$  не содержит:

$$\bigcup_{i \in I} V_i' = V_0''.$$

Данное ограничение выражает взаимосвязь между МС и РС в реальных инженерных сетевых системах (ИСС) [1, 2]. Исходя из ограничения 1 для РС нижнего уровня иерархии, сформулированного в [1, 2], и данного ограничения для МС верхнего уровня иерархии, можно заключить, что совокупность множеств исходных вершин РС  $\{V_i', i \in I\}$  образует разбиение на множестве выходных вершин МС  $V_0''$ .

2. Дуги графа  $G_0$  МС  $N_0$  не содержат пассивных элементов (ПЭ):  $E_0^p = \emptyset$ , где  $E_0^p$  — множество дуг графа  $G_0$  МС  $N_0$ , содержащих ПЭ. Это ограничение налагается в силу следующих причин. МС в силу функциональных особенностей конструктивно представляет собой сеть крупных трубопроводов, которая пропускает потоки относительно большой величины при относительно высоких напорах (потоки большой мощности) по сравнению с соответствующими величинами в РС.

Поэтому в рассматриваемой МС управление потокораспределением с помощью ПЭ приводит к существенным энергетическим потерям и в связи с этим является нецелесообразным.

Выполнение данного условия соответствует реализации принципа минимизации регулирующих воздействий в МС, который рассмотрен в [1, 2].

2. Граф  $G_0$  МС  $N_0$ , а следовательно и граф  $G_{0\alpha}$ , не содержит дуг, соединяющих между собой входные вершины множества  $V_0$  рассматриваемой МС.

Пусть какие-нибудь две входные вершины соединены дугой, представляющей нерегулируемый элемент (НЭ). В этом случае последовательная переменная (поток) в этой дуге определяется соотношением  $q_j = 0$  вследствие равенства напоров в рассматриваемых входных вершинах. Отсюда следует, что соединять входные вершины такими дугами нецелесообразно. Другим видом дуг, которые в соответствии с ограничением 2, могут иметь место, являются дуги, содержащие активные элементы (АЭ). Такими дугами соединять входные вершины МС  $N_0$  также нецелесообразно, поскольку фактически АЭ будет перекачивать поток из одного внешнего резервуара в другой.

Из проведенного анализа следует справедливость налагаемого условия в целом.

4. Все дуги графа  $G_0^*$  МС  $N_0$ , инцидентные входным вершинам  $x \in V_0'$ , содержат АЭ, причем никаких других АЭ МС  $N_0$  не содержит:  $E_0^a \subset E_0^*$ ,  $E_0^a = \{xi, \forall x \in V_0', u \in V_0^* \setminus V_0'\}$ ; где  $V_0'$  и  $V_0^*$  — множество входных вершин и множество всех вершин графа  $G_0^*$  МС  $N_0$  соответственно.

Такое расположение АЭ имеет место в реальных МС и обусловлено следующими причинами. Для напоров во входных вершинах  $x \in V_0'$  и в вершинах  $u \in V_0^* \setminus V_0'$ , не являющихся входными, графа  $G_0^*$ , имеет место соотношение:  $\forall x \in V_0', \forall u \in V_0^* \setminus V_0', z_x < z_u$ .

Направление потоков  $q_j$  в дугах  $j = xi$ , инцидентных входным вершинам, совпадают с направлением соответствующих дуг. Для реализации условия, когда потоки направлены от вершин с меньшими к вершинам с большими напорами, необходимо в соответствующие дуги установить АЭ. Этим и обусловлена необходимость установки АЭ во всех дугах графа  $G_0^*$  МС  $N_0$ , инцидентных входным вершинам.

Проведенный на основании [1, 2] анализ реальных конструкций МС показывает, что АЭ располагаются только в дугах, инцидентных входным вершинам. Расположение АЭ в других дугах МС  $N_0$  создает неравномерность распределения напоров в вершинах рассматриваемой МС, что ухудшает условия функционирования РС, а также уменьшает надежность МС  $N_0$ .

5. Во множество дуг  $E_0^\Gamma$ , являющихся НЭ, входят все дуги графа  $G_0^*$ , не содержащие АЭ, а также все фиктивные дуги графа  $G_0$  МС  $N_0$  — все источники и все стоки:  $E_0^\Gamma = E_0' \cup (E_0^* \setminus E_0^a) \cup E_0'' = E_0 \setminus E_0^a$ .

Все дуги множества  $E_o^* \setminus E_o^a$ , являясь участками МС  $N_o$ , в которых в силу ограничений 1 и 2 отсутствуют как АЭ, так и ПЭ, представляют реальные НЭ и войдут во множество  $E_o^I$ . Поскольку в действительности потребление потока МС  $N_o$  из внешней среды происходит множеством входных вершин  $V_o'$ , сопротивление дуг — источников множества  $E_o'$  являются постоянными величинами.

Следовательно, множество  $E_o'$  целесообразно включить во множество  $E_o^I$ . Поскольку в выходных вершинах  $x \in V_o''$  МС  $N_o$  происходит передача потока в РС  $N_i$ ,  $i \in I$ , которые не содержат АЭ, то можно считать, что каждый сток МС  $N_o$  из множества  $E_o^I$  является НЭ. Это означает, что при рассмотрении МС  $N_o$  все РС  $N_i$ ,  $i \in I$ , можно заменить стоками  $j \in E_o''$ , обладающими такими сопротивлениями, что установившееся потокораспределение в МС  $N_o$  остается неизменным. При этом множество  $E_o''$  включим во множество  $E_o^I$ . Кроме перечисленных, никаких других дуг множество  $E_o^I$  не содержит.

Пример моделирующего графа топологической структуры МС, удовлетворяющего перечисленным выше ограничениям 1—5, приведен в [1, 2].

6. При всех возможных установившихся потокораспределениях в МС не существует двух вершин  $x$ ,  $u \in V_o'''$ , для которых одновременно были бы справедливы следующие соотношения:  $z_x < z_o^*$ ,  $z_u > z_o^{**}$ ; где  $z_o^*$  и  $z_o^{**}$  — соответственно нижняя и верхняя границы области значений напоров в промежуточных вершинах МС  $N_o$ .

Рассматриваемое ограничение необходимо для создания допустимых режимов функционирования РС, подключенных к данной МС.

Используя перечисленные в данной работе ограничения, налагаемые на МС  $N_o$ , формализуем взаимосвязь между напорами  $z_x$  в вершинах  $x \in V_o^* \setminus V_o'$  и координатами  $\omega_j$  вектора состояния АЭ  $U_o^a \in \{U_o^a\}$  в рассматриваемой МС  $N_o$ .

Пусть в МС имеет место установившееся потокораспределение. Тогда при фиксированном значении вектора состояния НЭ  $G_o$  напор  $z_x$  в любой вершине  $x \in V_o^* \setminus V_o'$  является функцией координат  $\omega_j$ ,  $j \in E_o^a$ , вектора состояния АЭ  $U_o^a$  МС  $N_o$ :  $z_x = z_x(U_o^a) = z_x(\omega_j, j \in E_o^a)$ .

Областью определения каждой такой функции  $z_x$ ,  $x \in V_o^* \setminus V_o'$ , является область возможных значений вектора  $U_o^a$  — конечное множество  $\{U_o^a\}$ . При этом имеет место следующее утверждение.

При фиксированном значении вектора  $\Gamma_0$ , все  $z_x, x \in V_0^* \setminus V_0^*$ , являются ограниченными и возрастающими функциями по любому параметру  $\omega_j$ , принимающему значения на вполне упорядоченном конечном множестве  $\Omega_j$ , при условии, что все остальные параметры закреплены. Доказательство справедливости данного утверждения содержится в [1, 2].

Для реализации процесса оперативного управления МС  $N_0$  определим степень влияния всех АЭ рассматриваемой МС на напоры  $z_x$  для  $\forall x \in V_0^*$ .

С этой целью для  $\forall x \in V_0^*$  упорядочим множество  $E_0^a$  следующим образом.

1. Обозначим кратчайший путь из вершины  $u \in V_0^*$  в вершину  $x \in V_0^*$  как  $P(u, x)$ . Тогда для вершины  $x \in V_0^*$  полагаем  $j < k$ , если  $P(u^{(1)}, x) < P(u^{(2)}, x)$ , где  $j, k \in E_0^a$ ;  $u^{(1)}, u^{(2)} \in V_0^*$ ;  $j \in P(u^{(1)}, x)$ ;  $k \in P(u^{(2)}, x)$ .

2. Если для различных  $j, k \in E_0^a$ , входящих в состав кратчайших путей соответственно  $P(u^{(1)}, x)$  и  $P(u^{(2)}, x)$ , выполняется равенство  $P(u^{(1)}, x) = P(u^{(2)}, x)$ , то полагаем  $j < k$ , когда  $|\Omega_j| < |\Omega_k|$ .

3. В случае равенства  $P(u^{(1)}, x) = P(u^{(2)}, x)$  и  $|\Omega_j| = |\Omega_k|$  для  $j, k \in E_0^a$  упорядочение  $j < k$  производится по конструктивным параметрам АЭ, находящихся в дугах  $j$  и  $k$ .

Предположим, что все АЭ МС  $N_0$  занумерованы последовательными натуральными числами. В таком случае каждой промежуточной вершине  $x \in V_0^*$  графа  $G_0$  МС  $N_0$  соответствует вектор, обозначаемый  $D_x$ , компонентами которого являются номера АЭ, расположенные в порядке, соответствующем рассматриваемой промежуточной вершине  $x \in V_0^*$  МС  $N_0$ .

Построенная в настоящей работе модель оперативно управляемой МС может быть использована при синтезе глобальной системы оперативного управления иерархически организованной ИСС.

## Выводы

На основании выделения существенных свойств и характерных особенностей функционирования формализованы МС, являющиеся локальными сетями высшего уровня иерархии в составе иерархически организованных ИСС. Сформулировано утверждение, устанавливающее взаимосвязи между управляющими параметрами и параметрами уста-

новившихся потокораспределений в рассматриваемых МС. Полученные зависимости могут быть использованы для алгоритмизации локальных процессов оперативного управления МС в иерархически организованных ИСС.

### Литература

1. *Леви Л. И.* Декомпозиция в задачах моделирования процессов оперативного управления иерархически организованными инженерными сетевыми системами. — Луганск: Изд-во ВУГУ, 1996. — 122 с.

2. *Леви Л. И.* Иерархическая декомпозиция в задачах оперативного управления инженерными сетевыми системами. Дис... д-ра техн. наук: 05.13.07 — Луганск, 1999. — 342 с.