Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLII, № 2, 1989, с. 64—67.

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 622.691.4.001.24

С. Г. АКОПЯН

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ФОРМА ТЕОРЕМЫ ТЕЛЛЕДЖЯНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ЦЕПЯМ СИСТЕМ ТРАНСПОРТА ГАЗА

Рассматриваемая форма теоремы Телледжяна является новым для теории гидравлических цепей законом взаимосвязи параметров состояния газотранспортных систем. Рассматриваемый закон оформлен в виде энергетических уравнений баланса мощностей и квазимощностей, которые имеют простую структуру и при их применении открываются возможности получения существенно новых моделей и результатов в области анализа и оптимального проектирования развития газотранспортных систем.

Библиогр.: 2 назв.

Թելլեջյանի թեորեմի դիտարկված ձևը հիդրավլիկական շղթաների տեսության բնագավառում հանդիսանում է այդ համակարգերի վիճակը բնութագրող հիմնական պարամետրերի փոխկապվածության նոր օրենք։

Դիտարկված օրենքը ձևակերպված է հզորությունների և կեղծ հզորությունների հաշվեկշռային էներգետիկական հավասարումների տեսքով, որոնք ունեն պարզ կառուցվածք և նրանց կիրառումով հնարավորություններ են բացվում գազատրանսպորտային համակարգերի վերլուծության և օպտիմալ զարգացման նախագծման բնագավառում սկզբունքային նոր մոդելներ և արդյունքներ ստանալու համար։

В теории электрических цепей известна теорема Телледжяна [1, 2], базирующаяся на законах Кирхгофа и топологии цепей. Исследованием установлено, что она применима также к нелинейным гидравлическим цепям газотранспортных систем (ГТС) с учетом их специфических особенностей. Применение теоремы Телледжяна для электроэнергетических систем [2] является малоисследованной, а для гидравлических цепей ГТС—совершенно новой областью. В силу малой изученности и сложности ее применения для решения практических задач данная теория разработана недостаточно полно, хотя в последние годы методы этой теории стремительно развиваются и в других областях знаний. Теорема Телледжяна, получая интерпретацию для гидравлических цепей, играет фундаментальную роль для анализа чувствительности при оперативной коррекции текущих режимов и может явиться основой для построения прикладной теории для анализа и оптимального проектирования развития ГТС [2]. Поскольку в данной работе сформулирована модифицированная форма теоремы Телледжяна применительно к гидравлическим цепям ГТС, для выяснения сущности модификации рассмотрим отличительные особенности двух цепей, которые диктуют структуру построения энергетических уравнений гидравлических цепей ГТС. Эти цепи имеют свою специфику и отличаются от электрических цепей энергосистемы (кроме нелинейных зависимостей параметров состояния) тем, что в них: имеются только продольные элементы (трубопроводы и КС) и отсутствуют поперечные элементы и контуры; входы (источники газа) и выходы (потребители газа) осуществляются только одним доступным зажимом, где подключен идеальный источник потока газа (аналогично идеальному источнику тока электрической цепи) и не образуют ветви в гидравлической цепи; имеется элемент КС, который при неизменном потоке газа на участке резко поднимает давление газа на его выходе.

Теорема Телледжяна была сформулирована для электрической схемы, в которой источники питания и потребители имеют по два доступных зажима, составляют поперечные ветви и входят в поперечные замкнутые контуры электрической сети. Вышеперечисленные отличительные особенности привели к необходимости изменения (модификации) структуры энергетических уравнений, а именно: слагаемые мощностей и квазимощностей источников и потребителей газа поскольку не составляют ветви, выводятся из общей суммы слагаемых по ветвям контуров и добавляются в виде отдельной суммы по узлам ГТС с соответствующим учетом их знаков; в энергетических уравнениях вводятся дополнительные положительные слагаемые мощностей и квазимощностей, соответствующие участкам с КС.

В связи с рассмотрением нового закона взаимосвязи параметров гидравлического состояния возникла необходимость введения некоторых понятий, являющихся новыми физическими величинами для ГТС. Такими являются энергетические параметры, как например, мощности источников газа, потребителей газа и других элементов, которые лучше характеризуют потенциальные возможности системы в покрытии потребности газа. Для этого обратимся к элементам гидравлической цепи и определим их поведение через мощность или энергию. Скорость изменения энергии—это мощность, которая обозначается через S. Если P_j—давление газа j-ого узла ГТС, а q_j—приток газа в систему через источник потока газа, подключенный к j-ому входному узлу $(q_j > 0)$, то произведение $S_j = P_j q_j$ представляет собой мощность источника газа, подающего в систему через j-ый входной узел. При размерности потока $[q] =$ *млн м³/сут* и давления $[P] = 0{,}1$ *МПа* произведение Pq имеет размерность мощности $[S] = 1{,}11$ *МВт*. Если P_j — давление газа j-го узла ГТС, а q_j — отбор газа из системы потребителя газа j-го узла $(q_j < 0)$, то произведение $S_j = P_j q_j$ представляет собой отрицательную мощность потребителя газа, отбирающего из системы газ через j-ый выходной узел, и имеет размерность *МВт*. Рассмотрим теперь элементы газопровода и КС. Обозначим перепад давлений i-о газопроводного участка (ветви) между смежными узлами j и l через $\Pi_i = P_j - P_l$, а поток газа на этом участке, который направлен от узла высокого давления к узлу низкого давления — через Q_i. Тогда произведение $S_i = \Pi_i Q_i = (P_j - P_l) Q_i$ всегда положительное представляет собой потери мощности на этом участке и имеет размерность *МВт*. Таким образом, газопровод рассеивает энергию, т. е. в нем энергия необратимо расходуется, переходя в другие виды.

Для участка с КС произведение $S_i = \Pi_i Q_i = (P_j - P_k) Q_i$ представляет собой мощность, зависящую от полной мощности КС, которая непрерывно отдает энергию в сеть гидравлической цепи. В этом произведении разность давлений берется от узла низкого давления (вход КС) к узлу высокого давления (выход КС), поэтому она отрицательная величина, однако такие произведения в общем балансе мощностей системы следует учитывать с положительными знаками.

Для заданной конфигурации схемы ГТС потоки газа ветвей $Q = Q_i$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$ и задающие внешние узловые потоки газа $q = q_j$ $(j = 1, 2, \ldots, s)$ подчиняются первому закону Кирхгофа, т. е.

$$MQ = q, \tag{1}$$

где $M = [m_{ji}]$ — матрица соединений ветвей в узлах (первая матрица инциденций).

Для сети ГТС произвольной конфигурации закон Ома выражается матричным уравнением

$$M^t P^2 = [EC]|Q|Q - \varepsilon, \tag{2}$$

где E — единичная матрица размерности n^2; M^t — транспонированная матрица по отношению к M; $\varepsilon = \varepsilon_i = (a_i - 1) P_j^2$ — вектор дополнительных слагаемых уравнений (д. с. у.) КС; для газопроводных участков элементы вектора: $C_i = K_i$, а для участков с КС — $C_i = b_i$; K_i — эквивалентные параметры, учитывающие коэффициент гидравлического сопротивления, геометрические размеры газопровода, физические свойства и температуру газа; a_i, b_i — эквивалентные параметры КС, зависящие от параметров управления КС, температуры газа и др. Система взаимно независимых уравнений второго закона Кирхгофа в матричной форме может быть записана в виде

$$NM^t P^2 = N[EC]|Q|Q - \varepsilon_k, \tag{3}$$

где $N = [n_{ki}]$ — матрица соединений ветвей в независимые контуры (вторая матрица инциденций); k — число независимых контуров; $\varepsilon_k = N\varepsilon$ — вектор, элементы которого представляют алгебраические суммы *д. с. у.* КС, входящих в каждый независимый контур.

Согласно закону сохранения энергии можем записать баланс мощностей источников подачи газа, потребителей газа и потерь мощности (рассеянная энергия) в сети ГТС в виде

$$\sum_{j=1}^{s} P_j q_j - \sum_{i=1}^{n} \Pi_i Q_i = 0. \tag{4}$$

Выражение (4) является энергетическим уравнением баланса мощностей гидравлической цепи ГТС, которое представим в матричной форме записи

$$q^t P - Q^t M^t P = 0. \tag{5}$$

В (5) верхние индексы означают транспортированные векторы и матрицы. Пользуясь свойствами транспортированных матриц, уравнение (5) представим так

$$(q - MQ)^t P = 0. \tag{6}$$

Заметим, что в уравнении (6) выражение в круглых скобках представляет собой нулевую строку, поскольку она является уравнением первого закона Кирхгофа (1). Отсюда вытекает, что выражение (6), следовательно и (5) справедливо для любых произвольных значений вектора P, в том числе при значении узловых давлений, подчиняющихся второму закону Кирхгофа. Таким образом, если в (4) потоки газа и давления узлов являются параметрами состояния одной физической схемы ГТС, то они подчиняются первому (1) и второму (3) законам Кирхгофа, тогда произведение, входящее в (4), и уравнение в целом имеют физический (энергетический) смысл.

Предположим, что заданы исходная физическая схема ГТС, для которой составлено уравнение (4), и некоторая другая, инвариантная по топологии с исходной схемы (будем называть ее подобной). Если обозначить параметры состояния подобной схемы штрихом, то на основании уравнения (6) приходим к другим модифицированным формам теоремы Телледжяна применительно к гидравлическим цепям ГТС. Поскольку выражение (6) справедливо для произвольных значений компонентов вектора давления, то его можно взять равным вектору давления подобной схемы, т. е. $P = P'$.

Исходя из вышеизложенного, можем написать следующие новые энергетические уравнения баланса квазимощностей:

$$\sum_{j=1}^{n} P'_j q_j - \sum_{i=1}^{m} \Pi'_i Q_i = 0; \tag{7}$$

$$\sum_{j=1}^{n} P_j q'_j - \sum_{i=1}^{m} \Pi_i Q'_i = 0. \tag{8}$$

Уравнения (7) и (8) составлены для случая, когда подобная схема выбрана так, что на одноименных участках обеих схем имеются одинаковые элементы. В отличие от уравнения (4) равенства (7) и (8) лишены энергетического смысла, т. е. произведения, входящие в (7) и (8), не могут быть истолкованы как действительные мощности, поэтому их называют квазимощностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tellegen B. D.* A General Network Theorem, with Applications. — Phillips Res. Repl. — 1952. — № 7. — P. 259—269.
2. *Салливан Р. Л.* Проектирование развития электроэнергетических систем. — М.: Энергоиздат, 1982. — 360 с.

ЕрПИ им. К. Маркса 20. IV. 1988