

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Издаётся с 1947 г.

Կ Լ Բ Ե Դ Ի Կ Ե Զ Կ Ի Լ Ե Դ Ի Կ

Կուսյան Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Աղոնց Հ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Այերսեանի Վ. Վ., Անունյան Ա. Կ., Զաղոյան Մ. Ա., Հակոբյան Ռ. Կ.,
Սարգսյան Յու. Լ., Ստուկյան Մ. Գ., Տեր-Ազարե Ի. Ա.,
Փինաջյան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Գառնախանյանու ընտանոցի Ստեփանյան Զ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Касьян М. В. (ответ. редактор), Аюниц Г. Т. (зам. ответ. редактора),
Алексеевский В. В., Аняня А. К., Аюнян Г. Е., Завоян М. А.,
Пинаджян В. В. (зам. ответ. редактора), Саркисян Ю. Г.,
Стакин М. Г., Тер-Азирьев Н. А.
Ответственный секретарь Степанян Э. К.

Խմբագրությունը գտնվում էրևան-19, Բարեկամության փող. 24գ

Адрес редакции: Ереван-19, ул. Барекамутян, 24г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Н. В. ОЛЕФНИК, М. Г. СТАКЯН, С. А. ГАСПАРЯН

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЫНОСЛИВОСТИ ВАЛОВ
ПРИ НАГРУЖЕНИИ ЦИКЛИЧЕСКИМ ИЗГИБОМ
И СТАТИЧЕСКИМ КРУЧЕНИЕМ

Распространенный в практике случай нагружения валов симметричными напряжениями изгиба и постоянными напряжениями кручения неудовлетворительно описывается с помощью известных теорий прочности. Специальными исследованиями [1, 2 и др.] установлено, что при отсутствии концентрации напряжений зависимость предела выносливости σ_{-1} по нормальным напряжениям от налагаемого касательного напряжения τ до определенной величины последнего можно аппроксимировать монотонной, медленно убывающей функцией (рис. 1). По достижении критической величины $\tau_{кр}$ прочность резко снижается, однако указанному снижению обычно предшествуют пластические деформации в направлении действия крутящего момента. Появление ранних остаточных деформаций, особенно характерных для пластичных материалов, вынуждает реально допустимые касательные напряжения ограничивать величинами, меньшими $\tau_{кр}$. В пределах реальных значений τ , выражаемых, как правило, в долях предела σ_{-1} и неодинаковых для различных конструкционных материалов, легко дать математическое описание функции $\sigma_{-1}/\sigma_{-1} = f(\tau)$ [1, 2].

Функция $f(\tau)$ связана не только со свойствами материала детали, но и с напряженным состоянием и опасных ее сечений, обусловленным конструктивными концентраторами напряжений. И если применительно к гладким образцам из распространенных материалов она более или менее подробно исследована, то этого нельзя сказать в отношении образцов сложной формы и реальных валов. Известно, например, что для разных концентраторов напряжений может наблюдаться неодинаковое изменение предела выносливости σ_{-1} (рис. 2), причем, оно может быть и меньшим, и большим, чем у гладких образцов [1, 2]. Видимо, поэтому получила распространение рекомендация рассчитывать валы, подверженные однопременному действию симметричных напряжений изгиба и постоянных напряжений кручения докритической величины, без учета последних, т. е. как обычные оси. В общем, такую рекомендацию можно считать приемлемой, но приближенной, пригодной главным образом для традиционных расчетов на выносливость, когда запасы прочности принимаются достаточно большими. Это тем более очевидно, что

у отдельных материалов наложение касательного напряжения вызывало все же заметное снижение предела выносливости при симметричном изгибе [1, 2, 3].

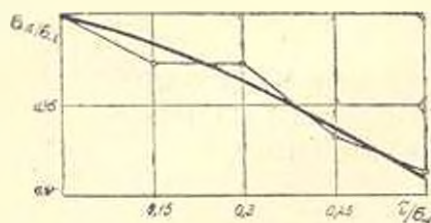


Рис. 1. Изменение предела выносливости гладких образцов из стали 45 в зависимости от налагаемого касательного напряжения.

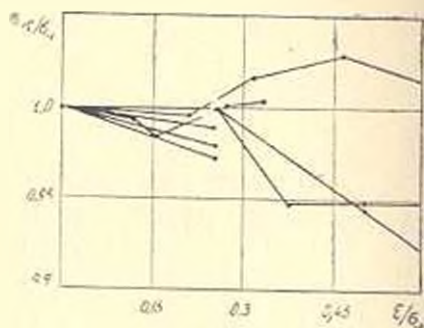


Рис. 2. Экспериментальные данные о пределах выносливости надрезанных образцов из различных сталей при циклическом изгибе и статическом кручении.

Поскольку экспериментальное определение функции $\sigma_{-1}/\sigma_{-1} = f(\tau)$ для всего многообразия конструктивных концентраторов напряжений практически недостижимо, представляет интерес применить аналитические методы оценки выносливости валов, работающих при указанном нагружении, которые опирались бы на более исследованное и доступное выражение этой функции для гладких образцов.

В качестве такого следует принять метод С. В. Серенсена и В. П. Когарева [4, 5], основанный на теории подобия усталостного разрушения и получивший благодаря хорошему соответствию опытным данным широкое распространение за последние годы.

Уравнение подобия для валов и деталей, подверженных нагружению симметричными напряжениями изгиба записывается в виде

$$\lg(\sigma_{-1}/\sigma_{-1} - \sigma_{н.г.}) = \lg(\sigma_{max} - \sigma_{н.г.}) = A - B \lg(LG_0) + uS, \quad (1)$$

Принимая $\sigma_{н.г.} = \sigma_{-1}$ и $\xi = \sigma_{max}/\sigma_{н.г.}$ (для эталонного образца $\xi = 1/\epsilon_{-1}$), уравнение (1) можно привести к виду

$$\lg(\xi - 1) = -B \lg(LG_0/L_0G) + \lg(1/\epsilon_{-1} - 1) + uS \quad (2)$$

или

$$\xi = 1 + (LG_0/L_0G)^{-B} \cdot (1/\epsilon_{-1} - 1) \cdot 10^{uS}, \quad (3)$$

где индексом „0“ отмечены величины, относящиеся к эталонному образцу, а выражение (LG_0/L_0G) представляет собой относительный безразмерный критерий подобия усталостного разрушения (обозначение параметров уравнений (1)–(3) дано в [6]). Между параметрами A и B уравнения (1) и пределом выносливости σ_{-1} существует соотношение

$$B = [A - \lg(\varepsilon_{-1} - 1) - \lg(1/\varepsilon_{-1} - 1)] \lg(L_0/G_0). \quad (4)$$

При $\varepsilon_{-1} = 0,5$ уравнения (2)–(4) существенно упрощается.

Запишем теперь уравнение подобия усталостного разрушения применительно к валам, нагруженным симметричным изгибом и постоянным кручением

$$\lg(\bar{\varepsilon}_1 - 1) = A - B \lg(L/G) - \lg \sigma_{н.г.} + uS, \quad (5)$$

где $\bar{\varepsilon}_1 = \sigma_{max}/\sigma_{н.г.} = \sigma_{-1н.г.} \cdot \sigma_{-1} / \sigma_{н.г.}$; $\sigma_{-1н.г.}$ — предел выносливости реального вала при одновременном действии переменного изгиба и постоянного кручения; σ_{-1} — коэффициент концентрации напряжений при изгибе и кручении; $\sigma_{н.г.}$ — нижняя граница напряжения σ_{max} (полагается независимой от характера нагружения).

Средневероятный предел выносливости эталонного образца при совместном нагружении симметричным изгибом и постоянным кручением найдем из того же уравнения (5)

$$\lg(\bar{\varepsilon}_{01} - 1) = A - B \lg(L_0/G_0) - \lg \sigma_{н.г.}, \quad (6)$$

где $\bar{\varepsilon}_{01} = \sigma_{-1}/\sigma_{н.г.}$ (в общем случае $\bar{\varepsilon}_{01} = \sigma_{-1н.г.}/\sigma_{н.г.}$); $\sigma_{-1н.г.}$ — исходный предел выносливости эталонного образца.

Из уравнений (5) и (6) получаем

$$\lg(\bar{\varepsilon}_1 - 1) = -B \lg(LG_0/L_0G) + \lg(\bar{\varepsilon}_{01} - 1) + uS, \quad (7)$$

Раскроем второе слагаемое первой части уравнения (7)

$$\lg(\bar{\varepsilon}_{01} - 1) = \lg(\sigma_{-1н.г.}/\sigma_{-1} \cdot \sigma_{-1} - 1) = \lg[f(\tau)/\varepsilon_{-1} - 1], \quad (8)$$

где $f(\tau)$ — известная из изложенного выше функция, определяющая отношение пределов выносливости эталонного образца при добавлении касательного напряжения и без него.

Учитывая в уравнении (7) выражение (8), после несложных преобразований получаем

$$\bar{\varepsilon}_1 = 1 + (LG_0/L_0G)^{-B} [f(\tau)/\varepsilon_{-1} - 1] \cdot 10^{uS}, \quad (9)$$

$$\sigma_{-1н.г.} = \bar{\varepsilon}_{01} \{\varepsilon_{-1} + \varepsilon_{-1} (LG_0/L_0G)^{-B} [f(\tau)/\varepsilon_{-1} - 1] \cdot 10^{uS}\} / \varepsilon_{01}. \quad (10)$$

При $\varepsilon_{-1} = 0,5$ и $u = 0$ ($P = 50\%$) имеем:

$$\sigma_{-1н.г.} = \bar{\varepsilon}_{01} \{0,5 + 0,5 (LG_{01}/L_0G)^{-B} [2f(\tau) - 1]\} / \varepsilon_{01}. \quad (11)$$

Если в уравнениях (9)–(11) функцию $f(\tau)$ положить равной единице, то придем к уравнениям, соответствующим случаю симметричного изгиба, т. е. к (3) и производным из него уравнениям, что естественно. Полученные уравнения при известной функции $f(\tau)$ и коэффициенте концентрации напряжений $\sigma_{н.г.}$ в опасном сечении при изгибе и кручении позволяют найти предел выносливости $\sigma_{-1н.г.}$ вала по пределу выносливости $\bar{\varepsilon}_{01}$ гладкого эталонного образца при симметричном изгибе.

бе, являющемуся наиболее распространенной и доступной характеристикой циклической прочности конструкционных материалов. Таким образом, в уравнениях (9) — (11) чувствительность материала к дополнительному нагружению статическими касательными напряжениями отражается функцией $f(\tau)$, а особенности конструктивной формы вала — коэффициентом концентрации напряжений α_{τ} . Тем самым достигается удовлетворительное приближение расчетных величин σ_{-1} к опытным.

В остальном использование уравнений подобия (9) — (11) не отличается от использования (3). Вычисление периметров L , относительных градиентов G и коэффициентов концентрации α производится согласно рекомендациям, приведенным в [4, 5]. Для назначения углового коэффициента B можно рекомендовать следующий подход. Вначале определить параметр A по эмпирическому уравнению регрессии, полученному в работе [7].

$$A = 1,099 \lg \bar{\sigma}_{-1} - 0,3566. \quad (13)$$

где $\bar{\sigma}_{-1}$ выражается в Мн/м^2 . Связи параметра A с пределом прочности материала, пределом выносливости и его логарифмом оказались достаточно тесными, особенно две последние, для которых коэффициент корреляции достиг 0,85, а нулевая гипотеза (о некоррелируемости величин) отвергалась при уровнях доверительной вероятности более 99% [7]. Затем по уравнению (4) вычислить параметр B . Наличие тесной корреляционной связи между величинами A и $\lg \bar{\sigma}_{-1}$ дает право говорить о существовании надежной связи и между величинами B и $\lg \bar{\sigma}_{-1}$. Это, в конечном счете, решает задачу о дифференцированном и однозначном выборе параметра B по механическим свойствам материала рассматриваемой детали.

В уравнении (13) фигурирует предел выносливости σ_{-1} , однако не будет большой ошибкой, если вместо него подставить предел $\bar{\sigma}_{-1}$. На значениях B , обычно округляемых до второго знака после запятой, это практически не отразится.

Рассеяние долговечности и пределов выносливости гладких и надрезанных образцов, испытанных при совместном нагружении циклическим изгибом и статическим кручением, оказалось не больше, чем при нагружении их только изгибом [1, 2]. Это позволяет считать, что при определении среднеквадратичного отклонения S для рассматриваемых валов, в первом приближении, можно пользоваться общими рекомендациями, относящимися к случаю простого напряженного состояния. Например, для конструкционных сталей можно принять $S = 0,045 - 0,050$. Суммарный коэффициент вариации предела выносливости вала с учетом внутри- и межплавочного рассеяния механических свойств материала и отклонений размеров концентратора от номинальных можно определить по формуле [4, 5]

$$v_{\bar{\sigma}_{-1}} = [v_{\sigma_{\max}}^2 + v_{\sigma_{-1}}^2 + v_{\alpha}^2]^{0,5}, \quad (14)$$

где $v_{\max}$, $v_{\max-1}$, v_1 — коэффициенты вариации напряжения $\sigma_{\max}$, предела выносливости для материала одной марки, но разных плавок, и теоретического коэффициента концентрации напряжений. Коэффициент v_1 определяется в зависимости от вида концентратора напряжений и точности его изготовления (например, от принятого допуска для радиуса галтели вала). Коэффициент $v_{\max-1}$ приближенно можно выбирать в пределах 0,05—0,10 [4, 5]. Для вычисления коэффициента $v_{\max}$ можно применять формулу

$$v_{\max} = \frac{(1 - 10^{-2B})(1/\varepsilon_0 - 1)(LG_0/L_0G)^{-B}}{2[1 + (1/\varepsilon_0 - 1)](L_0G_0/L_0G)^{-B}} \quad (15)$$

из анализа которой следует, что от точности назначения параметров B и ε_0 уравнений подобия (3), (9) и (10) зависит не только точность определения средневероятных напряжений $\sigma_{\max}$ или $\sigma_{\max-1}$ и самих пределов выносливости рассчитываемых деталей, но и точность расчетной оценки их рассеяния. Поэтому особенно важно назначать параметр B не по отдельным разрозненным данным, полученным в одном опыте для близкого по свойствам материала, а согласно обобщенным закономерностям его изменения, т. е. по формуле (4) с учетом уравнения (13). Что касается масштабного фактора ε_0 , то, по-видимому, до получения каких-либо дополнительных сведений для сталей его следует считать равным 0,5.

Таким образом, применение уравнения подобия усталостного разрушения к расчету валов, работающих в специфичных условиях нагружения, позволяет пересчитать значение ранее исследованных функций $f(\pm)$, длительное время не имеющих конкретного приложения, уточнить расчетную оценку выносливости валов с учетом их конструктивной формы и размеров и построить функцию распределения пределов выносливости, т. е. выполнить расчет вероятностными методами.

ЕрIII им. К. Маркса

Поступило 20.X.1978

Ն. Վ. ՕՆՅԱՆԻ, Մ. Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ո. Հ. ԳՈՐԳԱՐՅԱՆ

ԼՐԱԽՆԵՐԻ ԳԵՐԱՑԿՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ԴԵԱՀԱՏՈՒՐԸ
ՅԻՆԼԱՅԻՆ ԽՈՌՈՒՐՈՎ ԵՎ ՍՏԱՏԻՈՂՈՐՈՒՐՈՎ
ԸՆԹԱՆԱԼՈՐԵԼԻԻ ԳԵՊԻԹՈՒՐ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. է. մ.

Ցույց է տրված, որ տվյալ բեռնվածության տակ աշխատող լիսեռների զիմացկունության հաշվարկի զեպքում կարելի է կիրառել Սերենսեն-Կոդանի հոդածային քայքայման նմանության հավասարումը, եթե կա ողորկ էտալոնային փորձանմուշների զիմացկունության սահմանի ֆունկցիան՝ կախված

վերադիր շոշափող լարումներից ու տվյալ բեռնվածությունը համապատասխանող լարումների կուտակման տեսական գործակիցներից: Հաշվարկի ճշտությունը բարձրացնելու համար առաջարկվում է հանգամանորեն ընտրել նմանություն հավասարման փարամետրերը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гаспарян С. А., Стакян М. Г., Мак С. Л. О выносливости стали при совместном действии циклического изгиба и статического кручения. «Известия вузов. Машиностроение», 1969, № 9, с. 81—84.
2. Стакян М. Г., Мак С. Л. К исследованию циклической прочности и долговечности валов. «Машиноведение», 1970, № 5, с. 74—79.
3. Хейгауд Р. Б. Проектирование с учетом усталости. Перевод с англ. М., «Машиностроение», 1969, 504, с. с ил.
4. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М., «Машиностроение», 1975, 488 с. с ил.
5. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М., «Машиностроение», 1977, 232 с. с ил.
6. Олейник Н. В., Стакян М. Г. Расчетная оценка несущей способности осей при знакопостоянном циклическом нагружении. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXXI, № 6, 1978.
7. Олейник Н. В., Медведев С. А., Кравчук В. С. О расчете деталей станков на прочность по условию подобия усталостного разрушения. Респ. межвед. науч.-техн. сб. «Металлорежущие станки», вып. 5, Киев, «Техника», 1977, с. 46—49.

ЭНЕРГЕТИКА

С. Г. АКОПЯН, Л. А. ХЗМАЛЯН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ
ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ
НА АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

При эксплуатации сложных газотранспортных систем (ГТС) весьма важным является выбор режимных параметров газопроводов, компрессорных станций (КС) и других элементов, входящих в системы.

Для задач оптимизации сложных закольцованных ГТС представляется целесообразным совместное использование средств аналоговой и цифровой вычислительной техники, позволяющих полнее использовать потенциальные возможности обоих видов машин и рационально организовать вычислительный процесс.

В настоящей работе приводится математическая модель задачи оптимизации параметров сложной ГТС на аналого-цифровом вычислительном комплексе (АЦК). Рассматривается задача оптимального управления режимами ГТС, включающей магистральный газопровод, несколько КС, месторождения-регуляторы (МР) и подземные хранилища газа (ПХГ), потребители с переменным и постоянным потреблением газа в тоннах условного топлива. Для крупных потребителей задается характеристика эффективного газопотребления, построенная по шкале эффективности. Недостающее количество топлива покрывается вторым видом топлива. Работа КС задается в виде энерго-экономических характеристик (ЭЭХ). Поток с месторождений задается постоянными, т. е. предполагается, что они оптимальны и получены в результате оптимизационной задачи на уровне единой газоснабжающей системы. Что же касается МР и ПХГ, то для них рассматривается возможность обратной закачки газа при его излишках в газоснабжающей системе. Математически задача формулируется следующим образом.

Задана структура системы, постоянные потоки газа в систему, выраженные в тоннах условного топлива (т. у. т.), потребность в топливе у потребителей, энерго-экономические характеристики КС, технико-экономические характеристики и коэффициенты, характеризующие данную систему.

Требуется найти потоки Q_i -ого участка ГТС и потоки Θ_j крупных потребителей, подключенных к j -ому узлу, а также давления P_{ij} , которые минимизируют целевую функцию

$$\Phi = \sum_{i=1}^n Z_i (P_{i_{\text{вх}}}, P_{i_{\text{вых}}}, Q_i) - \sum_{j=1}^s \mathcal{E}_j(\Theta_j) + \sum_{j=1}^m G_j(T_j - \Theta_j) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^n a_{ji} Q_i = q_j + \Theta_j + p_j, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} P_j^2 = K_i Q_i |Q_i|, \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, s, s+1, \dots, m,$$

$$P_j \leq 56 \text{ кг/см}^2, \quad \text{если } j \text{ номер выхода КС}$$

$$P_i \geq \underline{P}_i, \quad j = 1, 2, \dots, s, \quad (4)$$

$$\underline{Q}_i \leq Q_i \leq \bar{Q}_i, \quad i = 1, 2, \dots, s,$$

$$\underline{\Theta}_j \leq \Theta_j \leq \bar{\Theta}_j, \quad j = 1, 2, \dots, s$$

Здесь $P_{i_{\text{вх}}}$, $P_{i_{\text{вых}}}$ — входные и выходные давления участков i ГТС с КС (кг/см^2);

$$P_i = \begin{cases} P_{i_{\text{вх}}} & \text{если } j \text{ номер входного узла участка } i \text{ с КС;} \\ P_{i_{\text{вых}}} & \text{если } j \text{ номер выходного узла участка } i \text{ с КС;} \\ P_j & \text{по всем остальным узлам;} \end{cases}$$

n — число участков, на которые разбита ГТС, при этом

$i = 1, 2, \dots, s$ — участки с КС;

$i = s+1, \dots, n$ — участки газопровода без КС;

m — общее количество узловых точек (узловой является точка постоянного и переменного потребления, подключения ГИГ, подачи газа в систему, вход и выход КС, точка разветвления газопроводов);

$\underline{Q}_i$, $\bar{Q}_i$ — минимальное и максимальное значения допустимого потока газа через i -ый участок ($\text{тыс. т. у. т./сут.}$);

$\underline{\Theta}_j$, $\bar{\Theta}_j$ — минимальное и максимальное значения переменного потока газа крупного потребителя, подключенного к j -ому узлу ($\text{тыс. т. у. т./сут.}$);

q_j — постоянный приток или отбор газа в систему через j -ый узел, при этом q_j берется со знаком плюс, если это постоянный приток, и со знаком минус, если это отбор ($\text{тыс. т. у. т./сут.}$);

T_j — задаваемая величина общего топливопотребления крупного потребителя j -го узла ($\text{тыс. т. у. т./сут.}$);

p_i — задаваемая величина потока газа с ПХГ, берется со знаком плюс, если производится отбор с ПХГ, и со знаком минус, если производится закачка в ПХГ;

a_{ij} — элементы матрицы инцидентий;

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{— поток газа по участку } i \text{ течет из узла } j; \\ -1 & \text{— поток газа по участку } i \text{ течет в узел } j; \\ 0 & \text{— потока газа по участку } i \text{ из узла } j \text{ нет.} \end{cases}$$

Строки этой матрицы соответствуют узлам схемы, а столбцы — ее участкам. Каждая строка показывает, какие участки соединены с данным узлом и какими пунктами — начальными (+1) или конечными (-1). Каждый столбец показывает, между какими узлами включен данный участок. Положительная единица является началом участка, отрицательная — его концом. Отсюда следует, что в каждом столбце может быть только две единицы — отрицательная и положительная, остальные элементы являются нулями.

Если матрицу инцидентий a_{ij} , составленную относительно всех узлов ГТС, транспонировать, заменить положительные единицы тех столбцов (узлов), в которых подключены КС, соответствующими эквивалентными параметрами a_i ($i=1, 2, \dots, s$) КС, то получим матрицу a'_{ij} .

$$K_i = \begin{cases} b_i & \text{для участков } i = 1, 2, \dots, s; \\ C_i & \text{для участков } i = s+1, \dots, n. \end{cases}$$

a_i, b_i — эквивалентные параметры КС, зависящие от относительного числа оборотов нагнетателей; C_i — постоянный для данной системы коэффициент, зависящий от конструктивных параметров газопроводов, физических свойств газа и единицы измерения потока газа;

$\sum_{i=1}^s Z_i(P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}, Q_i)$ — суммарные энергетические затраты в частях магистрального газопровода с КС в зависимости от потока газа и входного и выходного давлений.

Каждое слагаемое этой суммы можно аппроксимировать [1] полиномом второй степени вида

$$Z = a_0 + a_1 P_{\text{вх}} + a_2 P_{\text{вых}} + a_3 Q + a_4 P_{\text{вх}} P_{\text{вых}} + a_5 P_{\text{вх}} Q + a_6 P_{\text{вых}} Q + \\ + a_7 P_{\text{вх}} P_{\text{вых}} Q + a_8 P_{\text{вх}}^2 + a_9 P_{\text{вых}}^2 + a_{10} Q^2. \quad (5)$$

Для участков с газомоторкомпрессором расчет энергетических затрат осуществляется формулой:

$$Z = \left[A_N Q_N \left| Q \left(\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{н}}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right| + N_0 \right] T_z, \quad (6)$$

где A_N, a_N, h, N_0, T_z — постоянные величины.

В целевую функцию входит также $\mathcal{E}_j(\theta_j)$ — характеристика эффективности от использования газа потребителями взамен заменяющего вида топлива. Она также является оптимальной и получается в результате решения задачи нижнего уровня иерархии, т. е. оптимального распределения газа по процессам использования промышленными предприятиями в рамках одного потребителя с применением шкалы эффективности [2]. Для j -го потребителя ее можно аппроксимировать полиномом второй степени

$$\mathcal{E}_j(\theta_j) = -A_j\theta_j^2 + B_j\theta_j + D_j, \quad j = 1, 2, \dots, r,$$

$\sum_{j=1}^r G_j(T, -\theta_j)$ — затраты на второй вид топлива; G_j — стоимость тонны второго топлива у j -ого потребителя.

Уравнение баланса потоков газа (2) составляется для m узлов.

Целевая функция выражает энергетические затраты на КС, затраты на второй вид топлива и эффективное газораспределение между потребителями.

Решение задачи (1) — (4) на АЦК проводится в следующей последовательности.

Задаются начальные значения относительного числа оборотов и предварительная схема работы нагнетателей, по которым рассчитываются эквивалентные значения a_i и b_i , а также строятся энерго-экономические характеристики КС. В результате решения оптимизационной задачи оперативного управления находятся оптимальные (в первом приближении) значения Q_i , θ_j и P_j , по которым уточняются значения управляющих векторов по КС (схема работы, относительное число оборотов). При необходимости изменения схемы работы нагнетателей строится новая ЭЭХ КС и решается оптимизационная задача по уточненным значениям векторов управления КС. Задача считается решенной, оптимальные значения Q_i , θ_j и P_j найденными, когда разность между двумя значениями a_i и b_i получается в пределах заданной точности расчета. Так как относительное число оборотов нагнетателей меняется в малых пределах, то количество шагов уточнения будет небольшим. При таком подходе ЭЭХ не имеют разрывов первого рода и многоэкстремальность задачи исключается.

Для решения рассмотренной задачи в качестве начальных условий используется исходный нормальный режим, который получается в результате решения задачи гидравлического расчета РГС. Решение оптимизационной задачи предполагается осуществить на специализированном аналого-цифровом вычислительном комплексе (АЦК).

Трудность решения задачи (1) — (4) заключается в целевой функции, которая имеет сложную нелинейную структуру со многими переменными. Это можно в известной мере преодолеть, используя релаксационный метод расчета [3] на АЦК, при котором появляется возможность осуществить оптимизацию по отдельным независимым перемен-

ным векторам состояния P_j и Q_j , Θ_j . При этом нелинейная задача математического программирования разбивается на две задачи выпуклого математического программирования. Их можно реализовать известными математическими методами [3].

Релаксационный метод в применении к рассматриваемой задаче состоит в том, что фиксируется вектор давлений P_j узловых точек ГТС начального режима и отыскиваются те значения Q_j и Θ_j , которые при фиксированных значениях P_j дают минимальное значение целевой функции. Затем фиксируются полученные значения Q_j и Θ_j , и отыскиваются те значения P_j , которые при фиксированных значениях Q_j и Θ_j дают минимальное значение целевой функции. При фиксации набора вектора давлений целевая функция становится квадратичной выпуклой, как видно из (5) и (6) и т. к. ограничения (2) являются линейными, то решение этой задачи становится возможным на аналоговом оптимизаторе (АО) [4], входящем в АЦК. При фиксации набора вектора потоков целевая функция также становится квадратичной выпуклой и т. к. ограничения (3) являются также квадратичными выпуклыми, то решение можно осуществить на ЦВМ, также входящей в состав АЦК. Обмен и преобразование информации между АО и ЦВМ осуществляется аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями (АЦП и ЦАП).

Решение описанных задач на АЦК осуществляется следующим образом.

Значения P_j^0 , полученные после гидравлического расчета, являются начальным шагом для решения задачи в аналоговой части АЦК. На ЦВМ рассчитываются коэффициенты передачи, соответствующие давлению P_j^0 , и через ЦАП устанавливаются на усилителях АО и определяются с учетом двусторонних ограничений на потоки, экстремальные для P_j^0 , потоки Q_j^0 и Θ_j^0 .

Полученные значения Q_j^0 и Θ_j^0 передаются через АЦП в ЦВМ, где с фиксацией соответствующих значений Q_j^0 и Θ_j^0 решается задача оптимизации давлений с учетом ограничений на давления. По полученным экстремальным значениям пересчитываются соответствующие значения коэффициентов передачи и через ЦАП передаются в АО и т. д. Релаксационная процедура расчета считается законченной, когда

$$|P_j^{(r+1)} - P_j^{(r)}| \leq \epsilon, |Q_j^{(r+1)} - Q_j^{(r)}| \leq \epsilon, |\Theta_j^{(r+1)} - \Theta_j^{(r)}| \leq \epsilon, \quad (7)$$

где ϵ — заданная точность расчета; ϵ — шаг релаксационной итерации.

По полученным экстремальным значениям переменных в ЦВМ рассчитывается оптимальное значение целевой функции Φ . Так как оптимизационная задача является фактически коррекцией нормального режима ГТС, то количество релаксационных шагов итераций будет небольшим.

Ввиду того, что каждая из задач, решаемых на аналоговой и цифровой частях АЦК, является задачей выпуклого математического программирования, то они сходимы. Следовательно, релаксационная процедура также будет сходимой и полученный результат будет оптимальным [3].

Отметим, что задачу (1) — (4) можно также решить только на ЦВМ, однако использование АЦК значительно сокращает время решения.

Приведенная и ряд других решенных задач [4] показали, что применение АЦК сокращает время решения задачи почти вдвое.

С целью сокращения машинного времени решения задачи и уменьшения объема используемой памяти ЦВМ можно пойти на некоторое упрощение задачи (1) — (4), без существенного изменения результатов решения задачи. Задачу (1) — (4) можно решить, оптимизируя только потоки. При этом в каждом релаксационном шаге давления уточняются на ЦВМ, используя уравнение (3), приведенное к виду

$$P^{(r+1)} = \frac{EP^{(r)} + EQ^{(r)}}{E + Q},$$

где P_r, P_s — m -мерные вектора давлений узловых точек ГТС, отличающиеся друг от друга расположением компонентов; E, F — коэффициенты, характеризующие участок ГТС с КС или без КС.

По найденным значениям $P^{(r+1)}$ в каждом шаге релаксации определяются коэффициенты полинома (5) и (6), которые через ЦАП передаются в АЦК для нахождения оптимальных потоков данного релаксационного шага. Процесс считается законченным и решение получено, если выполняется одно из условий (7).

Таким образом, рассмотренная математическая модель позволяет оптимизировать потоки и давления (или только потоки) в сложной ГТС, а применение АЦК значительно сокращает общее время решения задачи, что особенно важно для задач оперативного управления.

Ереванский комплексный
отдел ВНИИЭГазпрома

Поступило 24.III.1978

И. 2. ՀԱՊԱՐԱՅՈՒՄ, Ը. Ա. ԿՈՄԻՏԵ

ԲՈՐԻ ԴԱԶԻՏՐԱՆՈՊՈՐՏԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ
ՕՊՏԻՄԱԼԻՑՄԱՆ ԽՆԴՐԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ
ԱՆԱԼԻԿԱ-ԹՎԱՅԻՆ ՀԱՇՎԻՉ ՀԱՄԱԼԻՐԻ ՕԴԵՈՒԹՅԱՄԲ

Ա. Մ Փ Ո Փ Ա Մ

Դիտարկվում է բարդ դադատրանսպորտային համակարգի օպտիմալ կառավարման խնդրի մաթեմատիկական մոդելը, որը պարունակում է մաթեմատիկային դադատար խողովակ, մի քանի կոմպրեսորային կայան, ատորիերկրյա գազամբար, կարգավորող դադահանքավայր և սպառիչներ: Ընդ որում հաշվի է առնվում խողոր սպառիչների միջև գազի բաշխման էֆեկտիվությունը և երկրորդային վառելիքը:

Խնդրի լուծումը կատարվում է անալոգա-թվային հաշվիչ համալիրի օգնությամբ, ուղակապցիոն մեթոդով, որը հնարավորություն է տալիս սաքիոնալ կազմակերպել հաշվման պրոցեսը, կրճատել հաշվիչ մեքենայի հիշողությունը և խնդրի լուծման ժամանակը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Унанян Л. А. Способ оптимизации развития газотранспортных систем РГС, РЖ «Трубопроводный транспорт», № 9. 45. 94. Деп., М., 1977, с. 18.
2. Рыс Г. С., Клокова Т. И., Крутикова И. П., Курносов И. П., Маркова Г. С., Райхер Э. А., Стрелец С. С. Методические указания по определению оптимальной структуры распределения газа в районных газоснабжающих системах. М., ВНИИЭГазпром, 1975, с. 81.
3. Раскин Л. Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. М., «Советское радио», 1976, с. 343.
4. Аюлян С. Г., Аветикова Е. Г., Маргарян А. Н. Совершенствование метода Цайна для применения при решении задач оптимизации потоков газотранспортной системы на аналоговой вычислительной машине. Тр. ВНИИЭГазпром, «Экономика газовой промышленности», вып. 1/3, М., 1974, с. 77—88.

ЭНЕРГЕТИКА

Р. А. АМИРИКЯН, И. П. ШАРАБХАНИЯН

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСЧЕТА
УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМ,
ВХОДЯЩИХ В ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЕ

В связи с развитием энергосистем (ЭС) и их объединением усложняются требования, предъявляемые к вычислительным машинам (ВМ) при расчете установившихся режимов энергообъединений (ЭО). Ограниченность оперативной памяти ВМ и большое время решения вынуждают инженеров использовать аналитические методы при решении сложных систем [1—6].

В предлагаемой работе описан алгоритм расчета установившегося режима сложных электроэнергетических систем (ЭЭС), основанный на методе деления сложной ЭЭС на несвязанные подсистемы (ПС) [1]. Предполагается, что ПС сложной ЭЭС являются ЭС, входящие в ЭО.

Постановка задачи. Заданы схема замещения ЭО, активные (g) и реактивные (b) узловые проводимости, базисный узел с напряжением U_0 .

ЭО расчленяется на несвязанные ЭС. Выводятся и решаются уравнения состояния для каждой ЭС. При этом в узлах ЭС, характеризующихся четырьмя режимными параметрами: активной и реактивной мощностью, модулем и аргументом комплексного напряжения, задаются два режимных параметра, два других определяются решением нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима.

Дополнительно составляется и решается система $M + N - 1$ уравнений (M —число межсистемных связей (МС), N —число ЭС в ЭО, где в качестве переменных рассматриваются токи в МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО).

Напряжения в узлах ЭС определяются как алгебраическая сумма напряжений от токов в узлах ЭС и токов в МС.

Алгоритм решения

1. Рассекаем ЭО по МС на несвязанные ЭС. Удаляем рассеченные МС. Задаемся в каждой ЭС опорным узлом, который замыкаем на базисный узел ЭО.

2. Составляем матрицу Y узловых проводимостей ЭС относительно опорного узла.

3. Решаем уравнения

$$I_m - Y_{m0} \dot{U}_0 = Y \dot{U}_{1m} \quad (1)$$

и определяем напряжения в узлах ЭС от их узловых токов, где I_m — токи в узлах ЭС; Y_{m0} — взаимная проводимость между данным и опорным узлами ЭС; $\dot{U}_{1m}$ — напряжения от узловых токов.

4. Составляем систему $M + N - 1$ уравнений (алгоритм будет дан ниже), откуда определяем неизвестные токи в МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО.

5. Решаем уравнения

$$I_m = Y \dot{U}_{2m} \quad (2)$$

и определяем напряжения в узлах ЭС от токов в МС, где I_m — дополнительные токи в узлах связи ЭС, вызванные токами в МС; $\dot{U}_{2m}$ — напряжения в узлах ЭС от токов в МС.

6. Определяем опорные напряжения ЭС:

$$\dot{U}_p = \dot{U}_0 + \Delta \dot{U}_p, \quad (3)$$

где $\Delta \dot{U}_p$ — падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО.

7. Результирующие напряжения в узлах ЭС:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{1m} + \dot{U}_{2m} + \Delta \dot{U}_p \quad (4)$$

Алгоритм составления уравнений МС

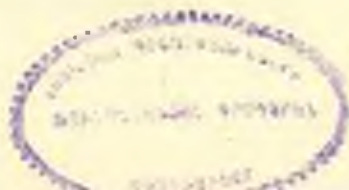
Разделение ЭО на ЭС удалением МС приводит к прекращению протекания токов между ЭС, поэтому в одних ЭС будет наблюдаться излишек тока, в других — нехватка. Если компенсировать излишек и нехватку токов в узлах связи ЭС и решать уравнения узловых напряжений каждой ЭС, то получим такое решение, как если бы ЭО не расчленилось на ЭС, а решалось целиком.

Таким образом, задача становится определенной, если будут известны токи в МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО.

Допустим, что через МС $mk, cd, ef, \dots$ протекают токи $I_{mk}, I_{cd}, I_{ef}, \dots$, где первые индексы принадлежат одним ЭС, а вторые — другим. Если $\dot{U}_m, \Delta \dot{U}_k, \Delta \dot{U}_c, \dots$ — падения напряжений между опорными узлами ЭС (к которым принадлежат узлы МС $m, k, c, \dots$) и базисным узлом ЭО, то уравнения МС с учетом пункта 7 алгоритма решения можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1m} + \dot{U}_{2m} + \Delta \dot{U}_m - \dot{U}_{1k} - \dot{U}_{2k} - \Delta \dot{U}_k &= Z_{mk} I_{mk}; \\ \dot{U}_{1c} + \dot{U}_{2c} + \Delta \dot{U}_c - \dot{U}_{1d} - \dot{U}_{2d} - \Delta \dot{U}_d &= Z_{cd} I_{cd}; \\ \dot{U}_{1f} + \dot{U}_{2f} + \Delta \dot{U}_f - \dot{U}_{1e} - \dot{U}_{2e} - \Delta \dot{U}_e &= Z_{fe} I_{fe}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $Z_{mk}, Z_{cd}, Z_{fe}, \dots$ — сопротивления МС.



В этой системе M уравнений напряжения в узлах ЭС: $\dot{U}_{1a}, \dot{U}_{1b}, \dot{U}_{1d}, \dot{U}_{1f}, \dot{U}_{1k}, \dot{U}_{1e}, \dots$ от узловых токов определяются из (1). А напряжения: $\dot{U}_{2a}, \dot{U}_{2c}, \dot{U}_{2d}, \dot{U}_{2f}, \dot{U}_{2k}, \dot{U}_{2e}, \dots$ от токов МС определяются из (2) через токи МС. Подставив их значения в (5), получим M уравнений с M неизвестными токами ($\dot{I}_i$) в МС и $N-1$ неизвестными падениями напряжений ($\Delta \dot{U}_p$) между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО. Дополнительные $N-1$ уравнений для определения неизвестных $\dot{I}_i$ и $\Delta \dot{U}_p$, составляемые по балансу токов в ЭС, будут:

$$\sum \dot{I}_i = -\dot{I}_p, \quad (6)$$

где $\sum \dot{I}_i$ — сумма токов МС, примыкающих к данной ЭС; $\dot{I}_p$ — суммарные токи ЭС, которые определяются следующим образом. Задаваясь начальными приближениями напряжений в узлах для каждой ЭС, кроме ЭС с базисным узлом, определяют суммарные токи

$$\dot{I}_p = \sum_{m=1}^n \left(\frac{\bar{S}_m}{\dot{U}_m} + y_{m*} \dot{U}_m \right),$$

где n — число узлов данной ЭС; $\bar{S}_m$ — комплексно-сопряженная мощность узла m ; $\dot{U}_m$ — комплексно-сопряженное напряжение узла m ; y_{m*} — поперечная проводимость узла m .

По мере уточнения напряжений узлов уточняются также токи $\dot{I}_p$.

Объединив систему уравнений (5) и (6) в матричное уравнение, неизвестные $\dot{I}_i$ и $\Delta \dot{U}_p$ определим:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \Delta \dot{U}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ii} & K_i \\ (K_i)_i & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_i \\ -\dot{I}_p \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Здесь $\Delta \dot{U}_i$ — падения напряжений в МС от узловых токов; Z_{ii} — подматрица коэффициентов неизвестных $\dot{I}_i$, которая является подматрицей сопротивлений узлов МС относительно опорных узлов ЭС, составление которой описано в [1]; K_i — подматрица соединений токов МС с ЭС. Столбцы ее соответствуют номерам ЭС, а строки — номерам узлов в сечениях МС. На пересечении соответствующих строки и столбца ставится $+1$, если ток входит в ЭС и -1 , если ток выходит из ЭС. Строки этой подматрицы показывают, какие две ЭС связывает МС, по которой проходит ток предварительного заданного нами направления;

$(K_i)_i$ — подматрица, полученная транспонированием K_i : $\begin{bmatrix} Z_{ii} & K_i \\ (K_i)_i & 0 \end{bmatrix} = K$ — квадратная, неособенная, симметричная матрица порядка $M + N - 1$. Первые M строк (i) ее соответствуют неизвестным токам МС (номерам узлов в сечениях), остальные $N - 1$ (p) — неизвестным

падениям напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО (номера ЭС):

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sp} \\ K_{ps} & K_{pp} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Последовательность расчета

1. Напряжения в узлах ЭС от их узловых токов:

$$U_{1m} = Z I_m + U_{\Delta},$$

где Z — матрица узловых сопротивлений ЭС относительно опорного узла, $Z = Y^{-1}$.

2. Падения напряжений в МС от узловых токов ЭС:

$$U_{\Delta} = \sum_i C_{i,m} U_{1m},$$

$C_{i,m}$ — матрица соединений токов МС с узлами ЭС [1].

3. Токи в МС:

$$I_k = K_{k,s} \Delta U_{\Delta} - K_{k,p} I_p.$$

4. Дополнительные токи в узлах связи ЭС, вызванные токами, протекающими в МС:

$$I_u = C_{m,i} I_k; \quad C_{m,i} = (C_{i,m})^t.$$

5. Дополнительные напряжения в узлах ЭС от токов в МС:

$$U_{2m} = Z I_u.$$

6. Падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО:

$$\Delta U_p = K_{p,s} \Delta U_{\Delta} - K_{p,p} I_p.$$

7. Напряжения опорных узлов:

$$U_p = \Delta U_p + U_{\Delta}.$$

8. Результирующие узловые напряжения:

$$U_m = U_{1m} + U_{2m} + \Delta U_p.$$

Так как по постановке задачи в узлах ЭС заданы не токи, а мощности, то определяя токи в узлах ЭС $I = \frac{P - jQ}{U}$, узловые напряжения вычисляем по одному из итерационных методов.

Пример расчета. Для сети, представленной на рис. 1, заданы токи в нагрузочных узлах — по 1 А, в генераторном узле (4) — 15 А, сопротивление ветвей — по 1 Ом, линий связи — 2 Ом, базисный узел (6) с напряжением $U_6 = 0$. Необходимо определить напряжения во всех узлах сети.

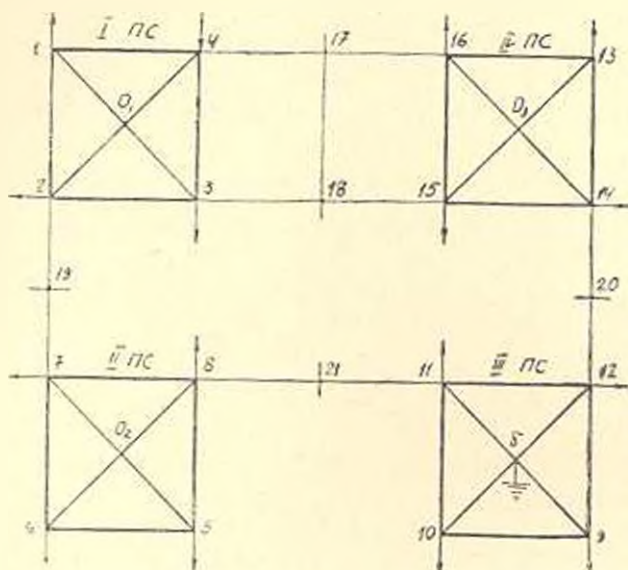


Рис. 1

Решение Систему рассекаем на четыре ПС. Задаемся направлениями токов в линиях связи, например, от ПС с меньшим номером к ПС с большим номером. После удаления рассеченных ветвей, задаемся опорными узлами в каждой ПС (O_1, O_2, O_3 , опорным узлом III ПС является базисный узел — 6), которые замкнув на базисный узел, определяем матрицу узловых проводимостей и узловых сопротивлений для каждой ПС:

$$Y^I = Y^{II} = Y^{III} = Y^{IV} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 3 \end{bmatrix};$$

$$Z^I = Z^{II} = Z^{III} = Z^{IV} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 7 & 3 & 2 & 3 \\ 3 & 7 & 3 & 2 \\ 2 & 3 & 7 & 3 \\ 3 & 2 & 3 & 7 \end{bmatrix}.$$

2. Узловые напряжения ПС от их узловых токов:

$$U_{Im}^I = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 33 \\ 17 \\ 33 \\ 97 \end{bmatrix}; \quad U_{Im}^{II} = U_{Im}^{III} = U_{Im}^{IV} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -15 \\ -15 \\ -15 \\ -15 \end{bmatrix};$$

3. Матрица сопротивлений узлов связей ПС относительно их опорных узлов:

$$Z_{\lambda} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 44 & 6 & 2 & 2 & 0 \\ 6 & 44 & 3 & 3 & 0 \\ 2 & 3 & 44 & 0 & -3 \\ 2 & 3 & 0 & 44 & -3 \\ 0 & 0 & -3 & -3 & 44 \end{bmatrix}.$$

4. Составляем подматрицу соединений токов в линиях связи с ПС.

$$K_{\lambda} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

5. Определяем подматрицу:

$$(K_{\lambda})_t = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

6. Падения напряжений в линиях связи ПС от их узловых токов:

$$\Delta U_{\lambda} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 112 \\ 48 \\ 32 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

7. Суммарные токи ПС:

$$I_p = \begin{bmatrix} 12 \\ -4 \\ -4 \end{bmatrix}.$$

8. Объединив все полученные подматрицы, вычислим токи в линиях связи и падения напряжений между опорными узлами ПС и базисным узлом:

$$\begin{bmatrix} I_{12} \\ I_{13} \\ I_{19} \\ I_{20} \\ I_{21} \\ \Delta U^I \\ \Delta U^{II} \\ \Delta U^{III} \end{bmatrix} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 44 & 6 & 2 & 2 & 0 & -15 & 0 & 15 \\ 6 & 44 & 3 & 3 & 0 & -15 & 0 & 15 \\ 2 & 3 & 44 & 0 & -3 & -15 & 15 & 0 \\ 2 & 3 & 0 & 44 & -3 & 0 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & -3 & -3 & 44 & 0 & -15 & 0 \\ -15 & -15 & -15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15 & 0 & -15 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 15 & 0 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 112 \\ 48 \\ 32 \\ 0 \\ 0 \\ -180 \\ 60 \\ 60 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} I_{17} \\ I_{18} \\ I_{19} \\ I_{20} \\ I_{21} \end{bmatrix} = \frac{1}{641} \begin{bmatrix} 2848 \\ 1740 \\ 3104 \\ -2024 \\ 540 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U^I \\ \Delta U^{II} \\ \Delta U^{III} \end{bmatrix} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 145880 \\ 20520 \\ 79760 \end{bmatrix}.$$

9. Напряжения в узлах ПС от токов в линиях связи:

$$U_{2m}^I = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} -21336 \\ -32644 \\ -30036 \\ 31364 \end{bmatrix}; \quad U_{2m}^{II} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 4588 \\ 8232 \\ 20108 \\ 5532 \end{bmatrix};$$

$$U_{2m}^{III} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 7152 \\ 5668 \\ 9852 \\ 15788 \end{bmatrix}; \quad U_{2m}^{IV} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 5952 \\ -3252 \\ 14652 \\ 21108 \end{bmatrix}.$$

10. Опорные напряжения ПС:

$$\begin{bmatrix} U_{o_1} \\ U_{o_2} \\ U_{o_3} \end{bmatrix} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 145880 \\ 20520 \\ 79760 \end{bmatrix}.$$

11. Результирующие узловые напряжения ПС:

$$U_m^I = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 145697 \\ 124133 \\ 136997 \\ 176693 \end{bmatrix}; \quad U_m^{II} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 15493 \\ 19137 \\ 31013 \\ 16437 \end{bmatrix};$$

$$U_m^{III} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} -2463 \\ -3947 \\ 237 \\ 6173 \end{bmatrix}; \quad U_m^{IV} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 76097 \\ 66893 \\ 84794 \\ 91253 \end{bmatrix}.$$

Выводы

1. Предложен алгоритм расчета установившегося режима ЭО методом деления его на изолированные ЭС.

2. Предложенный алгоритм в отличие от [1] не требует построения искусственной цепи, матрицы соединения токов в ней и вычислений, связанных с этой матрицей.

3. Для определения токов в МС по [1] требуется обращение матрицы на $2(N-1)$ меньшего порядка, чем порядок матрицы K . Однако, для реальных ЭО число ЭС и МС ($M + N - 1$), определяющих порядок матрицы K , не могут быть такими большими, что вызвало бы затруднение с обращением этой матрицы. Кроме того, в процессе итерационного расчета установившегося режима эта матрица обращается один раз.

Армения

Поступило 10.VII 1978

Н. А. ԱՊԻՐԻՅԱՆ, Ի. Ի. ՆԱՐԵԿԱՆՅԱՆ

ԷՆԵՐԳԻԱՄԵԿԱՆՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄԵՋ ՍՏՆՈՂ ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ԹԵԺՈՒՄԻ ՀԱՇՎՄԱՆ ՄԻ ԱԼԳՈՐԻԹՄԻ ՄԱՍԻՆ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. լ. մ.

Առաջարկվում է էներգամիավորումների մեջ (էՄ) մտնող էներգամիակարգերի (էՀ) հաստատված ուժի մի հաշվարկի ալգորիթմ՝ հիմնված էՄ-ները շփապակցված էՀ-երի տրոհման մեթոդի վրա:

Հաշվարկը կատարվում է երկու փուլով: Սկզբում հայտնի մեթոդներով որոշվում են առանձին էՀ-երի ուժի մեծությունը՝ առանց հաշվի առնելու հոսքերը միջհամակարգային կապերում (ՍԿ): Այնուհետև բառ նրանց արդյունքների որոշվում են հոսքերը ՄԿ-երում, որոնց ապդեցությունը էՀ-երում ՍԿ-երի հանգույցներում որոշվում են հաշվարկելի պարամետրների լրացուցիչ բաղադրիչներ և վերջնականապես ճշավում էՀ-երի ուժի մեծությունը:

Ալգորիթմը կարելի է կիրառել բարդ համակարգերի օպտիմալացման, ղեկավարման և կայունության պրոբլեմների լուծման խնդիրներում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям-диакоптика. М., «Наука», 1972.
2. Хэлл Х. Диакоптика и электрические цепи. М., «Мир», 1974.
3. Хачатрян В. С. Метод и алгоритм расчета установившегося режима больших электроэнергетических систем. «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», 1973, № 4.
4. Под ред. Веникова В. А. Применение вычислительных машин и энергетике. М., «Энергия», 1968.
5. Курьянин А. Ф., Махнитко А. Е. Расчет электрических сетей при заданных мощностях в узлах методом разбиения на подсистемы. «Электричество», 1972, № 5.
6. Аширикан Р. А., Шарабханян Н. Н. Алгоритм расчета установившегося режима энергосистем, входящих в энергообъединение, с учетом ограничений на потоки межсистемных связей. Тез. докл. науч.-техн. совещ. «Научно-технические проблемы развития и совершенствования автоматизации управления в энергосистемах», Минск, 1977.

ЭНЕРГЕТИКА

А. А. АРУТЮНЯН

ИССЛЕДОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГИБРИДНОЙ МАТРИЦЫ В РАСЧЕТАХ УСТАНОВИВШИХСЯ
РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Расчеты потерь мощности в электрических сетях 35 кВ и выше с целью определения структуры потерь энергии связаны с проблемой сходимости итерационного процесса при решении уравнений установившегося режима. Известно, что для этих целей применяются уравнения, основанные на матрицах Y или Z .

В работах [1—3] показана возможность совместного использования матриц Y и Z , названной гибридной матрицей. При этом появляется возможность использования преимуществ этой матрицы для улучшения сходимости итерационных процессов.

В данной статье приводятся методика, алгоритм и программа расчета установившегося режима электрической системы на базе гибридной матрицы (ГМ). Приведены также результаты исследования сходимости итерационного процесса при решении уравнений установившегося режима электрической системы по методу Зейделя. Рассматриваются некоторые особенности решения этих уравнений по методу Ньютона, смешанного применения методов Зейделя—Ньютона для отдельных подматриц ГМ.

Постановка задачи. Задаются:

- параметры схемы замещения в форме связей узлов и соответствующих им активных и реактивных сопротивлений ветвей схемы;
- параметры режима P , Q или P , U , а для узла баланса мощностей — U , φ .

Здесь P , Q — соответственно, активные и реактивные мощности; U , φ — модуль и фаза напряжения.

Требуется определить:

φ , U и φ , Q — соответственно, для узлов типа P , Q и P , U ; P , Q — для узла баланса мощностей.

Разделим множество N , всех узлов схемы на подмножества генераторных (Г), нагрузочных (Н) и сетевых (пассивных) (П) узлов схемы, т. е.:

$$Г \subset N; \quad Н \subset N; \quad П \subset N \quad (1)$$

Число элементов этих подмножеств обозначим, соответственно, литерой g, n, p .

Гибридные уравнения, полученные из уравнений узловых напряжений, имеют следующий вид [2].

Z — Y -форма:

$$\left[\begin{array}{c|c} Y_{ck}^{-1} & -Y_{ck}^{-1}Y_{cm} \\ \hline Y_{sk}Y_{ck}^{-1} & Y_{sm} - Y_{sk}Y_{ck}^{-1}Y_{cm} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \hat{I}_k \\ \hat{U}_m \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \hat{U}_c \\ \hat{I}_s \end{array} \right]; \quad (2)$$

Y — Z форма:

$$\left[\begin{array}{c|c} Y_{ck} - Y_{cm}Y_{sm}^{-1}Y_{sk} & Y_{cm}Y_{sm}^{-1} \\ \hline -Y_{sm}^{-1}Y_{sk} & Y_{sm}^{-1} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \hat{U}_k \\ \hat{I}_s \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \hat{I}_c \\ \hat{U}_c \end{array} \right]. \quad (3)$$

В (2) и (3) в общем случае (без эквивалентирования исходной схемы, т. е. без исключения узлов, входящих в подмножество Π):

$$c, k = \overline{1, g}; \quad s, m = \overline{g+1, n+p}.$$

В [3] приведен алгоритм формирования ГМ на ЦВМ, входящей в (2), с помощью которого без изменений в программе можно формировать также ГМ, входящую в (3), начав нумерацию узлов схемы в обратном порядке.

Учитывая, что при обратной нумерации узлов меняется обусловленность, а следовательно, и сходимость итерационного процесса. балансирующий узел следует выбирать согласно [4], где доказано, что если он предварительно выбран, то изменение нумерации узлов схемы не изменит коэффициента обусловленности системы узловых уравнений и не повлияет на скорость сходимости итерационных методов. Такой подход позволит сравнивать сходимость итерационных процессов уравнений (2) и (3).

Принимая, что ГМ сформирована, уравнение (2) запишем в следующей форме [3]:

$$\left[\begin{array}{c|c} r_{ck} + jx_{ck} & d_{cm} + jd_{cm} \\ \hline d_{sk} + jd_{sk} & g_{sm} - jb_{sm} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} P_k - jQ_k \\ \frac{U_s e^{-j\theta_s}}{U_m e^{-j\theta_m}} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \frac{U_c e^{j\theta_c}}{P_c - jQ_c} \\ \frac{U_s e^{-j\theta_s}}{U_c e^{-j\theta_c}} \end{array} \right]. \quad (4)$$

С целью отделения действительных и мнимых частей зависимых и независимых параметров, уравнение (4) запишем в форме двух следующих слагаемых:

$$\sum_{k \in \Gamma} (r_{ck} + jx_{ck}) \frac{P_k - jQ_k}{U_k e^{-j\theta_k}} + \sum_{\substack{c \in \Gamma \\ m \in \Pi}} (d_{cm} + jd_{cm}) U_c e^{j\theta_c} = U_c e^{j\theta_c}; \quad (4a)$$

$$\sum_{k \in \Gamma} (d'_{ek} + j d''_{ek}) \frac{P_k - j Q_k}{U_k e^{-j\varphi_{ek}}} + \sum_{\substack{s \in \Pi \\ s \neq e}} (g_{es} - j b_{es}) U_s e^{j\varphi_{es}} \frac{P_s - j Q_s}{U_s e^{-j\varphi_{es}}} \quad (46)$$

Из (4а) в координатах U и s [5], где $s = \sin \Psi$, напомним уравнения активных и реактивных мощностей для узлов, входящих в подмножество Γ :

$$\frac{P_e}{U_e} = \frac{1}{r_{ee}^2 + x_{ee}^2} (U_e r_{ee} - c_e A_e - s_e B_e); \quad (5)$$

$$\frac{Q_e}{U_e} = \frac{1}{r_{ee}^2 + x_{ee}^2} (U_e x_{ee} - s_e A_e + c_e B_e), \quad (6)$$

где

$$A_e = r_{ee}(\beta_{ek} + \beta_{em}) + x_{ee}(\alpha_{ek} + \alpha_{em});$$

$$B_e = r_{ee}(\alpha_{ek} + \alpha_{em}) - x_{ee}(\beta_{ek} + \beta_{em});$$

$$\alpha_{ek} = \sum_{\substack{u \in \Gamma \\ u \neq k}} \frac{1}{U_k} [(r_{ek} P_k + x_{ek} Q_k) s_k - (r_{ek} Q_k - x_{ek} P_k) c_k];$$

$$\alpha_{em} = \sum_{\substack{m \in \Pi \\ m \neq e}} U_m (d'_{em} s_m + d''_{em} c_m); \quad \beta_{em} = \sum_{\substack{m \in \Pi \\ m \neq e}} U_m (d'_{em} c_m - d''_{em} s_m);$$

$$c_m = \sqrt{1 - s_m^2}.$$

Таким же образом из (4б) получим уравнения активных и реактивных мощностей для узлов, входящих в подмножество Π :

$$\frac{P_s}{U_s} = A_s c_s + B_s s_s + U_s g_{ss}; \quad (6a)$$

$$\frac{Q_s}{U_s} = A_s s_s - B_s c_s + U_s b_{ss}, \quad (6б)$$

где

$$A_s = \sum_{\substack{k \in \Pi \\ k \neq s}} \frac{1}{U_k} (\alpha_{sk} c_k - \beta_{sk} s_k) + \sum_{\substack{s \in \Pi \\ m \neq s}} U_m (g_{sm} c_m + b_{sm} s_m);$$

$$B_s = \sum_{\substack{k \in \Pi \\ k \neq s}} \frac{1}{U_k} (\alpha_{sk} s_k + \beta_{sk} c_k) + \sum_{\substack{s \in \Pi \\ m \neq s}} U_m (g_{sm} s_m - b_{sm} c_m);$$

$$\alpha_{sk} = d'_{sk} P_s + d''_{sk} Q_k; \quad \beta_{sk} = d'_{sk} P_k - d''_{sk} Q_s.$$

Формулы приростов искоемых переменных U и s

Рассматривая каждую из величин P_e , Q_e и P_s , Q_s , соответственно, как функцию переменных s_e , U_e и s_s , U_s , можно записать следующие уравнения приростов:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_c}{\partial s_k} & \frac{\partial P_c}{\partial s_m} \\ \frac{\partial P_s}{\partial s_k} & \frac{\partial P_s}{\partial s_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta s_k}{\Delta s_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_c}{\Delta P_s} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial Q_c}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_c}{\partial U_m} \\ \frac{\partial Q_s}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_s}{\partial U_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta U_k}{\Delta U_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_c}{\Delta Q_s} \end{bmatrix},$$

где $\Delta P = P - P^i$; $\Delta Q = Q - Q^i$; P, Q — заданные значения мощностей; P^i, Q^i — расчетные значения в i -ом шаге итерации;

$$\frac{\partial P_c}{\partial s_c} = \frac{1}{c_c} \left(\frac{U_c^2 x_{cc}}{z_c^2} - Q_c \right); \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_c}{\partial s_k} = \frac{U_c}{c_k z_{ck}^2} (\lambda_c x_{ck} - \mu_c \beta_{ck}); \quad (7a)$$

$$\frac{\partial P_c}{\partial s_m} = \frac{U_c}{c_m z_{cm}^2} (\lambda_c x_{cm} - \mu_c \beta_{cm}); \quad (7b)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial U_c} = \frac{U_c x_{cc}}{z_{cc}^2} + \frac{Q_c}{U_c}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial U_k} = \frac{U_c}{U_k z_{ck}^2} (\mu_c x_{ck} - \lambda_c \beta_{ck}); \quad (8a)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial U_m} = \frac{U_c}{z_{cm}^2} (\lambda_c x_{cm} - \mu_c \beta_{cm}). \quad (8b)$$

Здесь

$$z_{cc} = \sqrt{r_{cc}^2 + x_{cc}^2}; \quad \lambda_c = r_{ck} c_k - x_{ck} s_c; \quad \mu_c = r_{cm} c_m + x_{cm} s_c;$$

$$a_{ck} = \frac{1}{U_k} (M_{ck} s_k - N_{ck} c_k); \quad \beta_{ck} = \frac{1}{U_k} (M_{ck} c_k + N_{ck} s_k);$$

$$M_{ck} = r_{ck} P_k + x_{ck} Q_k; \quad N_{ck} = r_{ck} Q_k - x_{ck} P_k;$$

$$a_{cm} = \frac{1}{U_m} (d'_{cm} s_m + d'_{cm} c_m); \quad \beta_{cm} = \frac{1}{U_m} (d'_{cm} c_m - d'_{cm} s_m).$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial s_s} = \frac{1}{c_s} (U_s^2 b_{ss} - Q_s); \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial s_k} = \frac{U_s}{U_k c_k} (\lambda_s s_k - \mu_s c_k); \quad (9a)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial s_m} = \frac{U_s U_m}{c_m} (\mu_s s_s - \lambda_s c_s); \quad (9b)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial U_s} = U_s b_{ss} + \frac{Q_s}{U_s}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial U_k} = \frac{U_s}{U_k^2} (\mu_{sk} c_k - i_{sk} s_k); \quad (10a)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial U_m} = U_s (\mu_{sm} s_m - \lambda_{sm} c_m), \quad (10b)$$

где

$$i_{sk} = x_{sk} c_k - g_{sk} s_k; \quad \mu_{sk} = \alpha_{sk} s_k + \beta_{sk} c_k;$$

$$\mu_{sm} = g_{sm} c_m + b_{sm} s_m; \quad \lambda_{sm} = g_{sm} s_m - b_{sm} c_m;$$

$$\alpha_{sk} = d_{sk} P_k - d_{sk} Q_k; \quad \beta_{sk} = d_{sk} P_k - d_{sk} Q_k.$$

Алгоритм и программа расчета установившегося режима электрической системы по строчным уравнениям на базе ГМ основаны на формуле приростов искоемых величин, которые определяются из (5), (6):

$$\Delta s_c = \frac{1}{\frac{\partial P_c}{\partial s_c}} \left[\Delta P_c - \sum_{k=1}^n \frac{\partial P_c}{\partial s_k} \Delta s_k - \sum_{m=1}^m \frac{\partial P_c}{\partial s_m} \Delta s_m \right]; \quad (11)$$

$$\Delta U_c = \frac{1}{\frac{\partial Q_c}{\partial U_c}} \left[\Delta Q_c - \sum_{k=1}^n \frac{\partial Q_c}{\partial U_k} \Delta U_k - \sum_{m=1}^m \frac{\partial Q_c}{\partial U_m} \Delta U_m \right]; \quad (12)$$

$$\Delta s_k = \frac{1}{\frac{\partial P_k}{\partial s_k}} \left[\Delta P_k - \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_k}{\partial s_j} \Delta s_j - \sum_{m=1}^m \frac{\partial P_k}{\partial s_m} \Delta s_m \right]; \quad (13)$$

$$\Delta U_k = \frac{1}{\frac{\partial Q_k}{\partial U_k}} \left[\Delta Q_k - \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_k}{\partial U_j} \Delta U_j - \sum_{m=1}^m \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} \Delta U_m \right]. \quad (14)$$

В программе реализованы расчетные уравнения для величин U и s в следующей форме (блок-схема программы представлена на рис. 1):

$$s_c^{i+1} = s_c^i + \frac{c_c^i \Delta P_c^{i+1}}{\frac{(U_c^i)^2 x_{cc}}{z_{cc}^2} - Q_c}; \quad (15)$$

$$U_c^{i+1} = U_c^i + \frac{\Delta Q_c^{i+1}}{\frac{U_c^i x_{cc}}{z_{cc}^2} + \frac{Q_c}{U_c^i}}; \quad (16)$$

$$s_s^{i+1} = s_s^i + \frac{c_s^i \Delta P_s^{i+1}}{(U_s^i)^2 b_{ss} - Q_s}; \quad (17)$$

$$U_i^{l+1} = U_i^l + \frac{\Delta Q_i^{l+1}}{U_i^l b_{ii} + \frac{Q_i}{U_i^l}} \quad (18)$$

Для определения величины потерь электроэнергии на основе вычислений серии режимов данной сети, после обеспечения сходимости итерационного процесса, определяются потери активной и реактивной мощностей каждого режима по алгоритму, приведенному в [6].

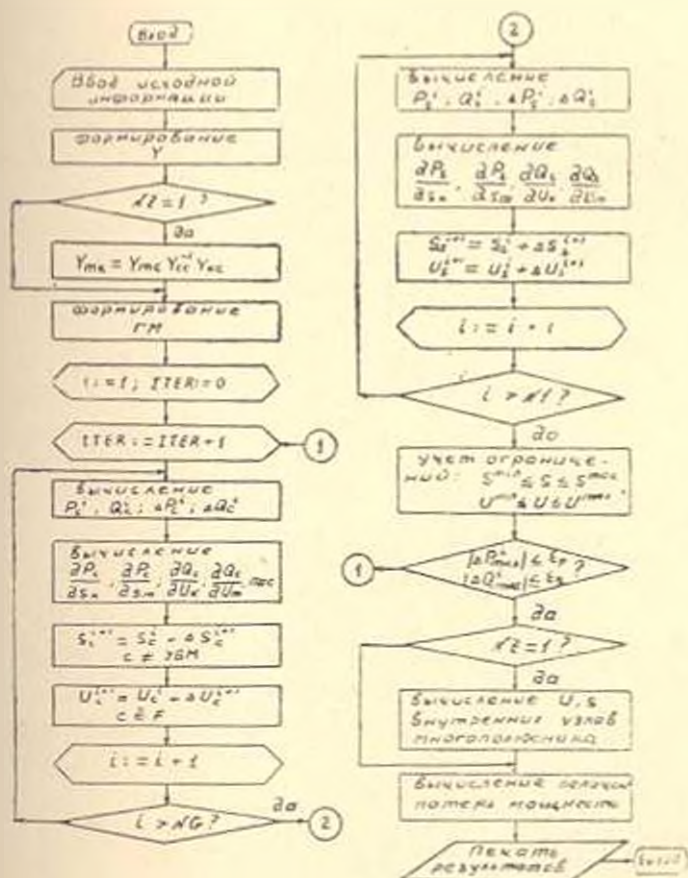


Рис. 1. Блок-схема программы расчета установившегося режима электрической системы по методу Зейделя на базе ГМ $Z-Y$ -формы: $NZ=1$ — признак эквивалентирования исходной схемы; YBM — тесла баланса мощностей; F — подмножество опорных узлов схемы; $N1$ — порядок системы; NG — порядок Z подматрицы; ϵ — точность сходимости итерации.

В случае применения ГМ $Z-Y$ -формы число шагов итерации для приведенного в [7] примера (10 узлов, 15 ветвей) по сравнению с Y сокращается на 45 шагов (рис. 2). Необходимое машинное время для решения задачи на ЦВМ, как известно, зависит также от качества составленной программы. По экспериментальной программе, составленной ав-

тором, машинное время сокращается на 25%, что, естественно, не является пределом.

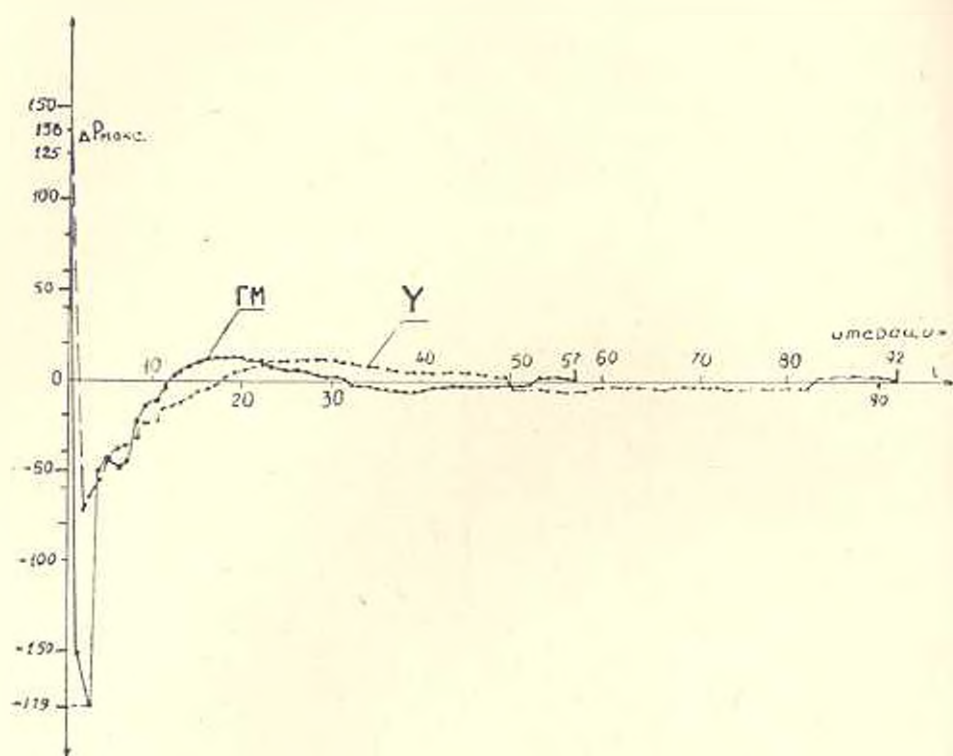


Рис. 2. Сходимость итерационного процесса при решении уравнений Y -формы и Z - Y -формы (ГМ) по методу Зейделя.

Как показывают расчеты, число шагов итерации с применением ГМ зависит от отдельных блоков подматриц, т. е. от порядка Z и Y . При Z - Y -форме ГМ для рассматриваемого примера имеет место следующее соотношение числа шагов итерации и порядка Z подматрицы (табл. 1).

Таблица 1

Порядок Z подматрицы	1	2	3	4	5	6	7
Число шагов итерации	130	118	109	90	76	65	47

Создана также экспериментальная программа расчета установившегося режима на базе ГМ по методу Ньютона и, отдельно, программа смешанного применения методов Ньютона и Зейделя. Метод Зейделя, успешно применяемый в расчетах с подматрицей Z , используется для Z подматрицы ГМ по описанному выше алгоритму и уравнениям (5), (5а), (15), (16). Метод Ньютона, успешно применяемый для уравнений на базе матрицы Y , используется относительно подматрицы Y в ГМ по следующим выражениям:

$$\left| \frac{\Delta P_s}{\Delta s_m} \right| \cdot |\Delta s_m| = |\Delta P_s| - \left| \frac{\partial P_s}{\partial s_k} \right| \cdot |\Delta s_k|; \quad (19)$$

$$\left| \frac{\partial Q_s}{\partial U_m} \right| \cdot |\Delta U_m| = |\Delta Q_s| - \left| \frac{\partial Q_s}{\partial U_k} \right| \cdot |\Delta U_k|. \quad (20)$$

Преимущества какой-либо из этих программ покажут дальнейшие исследования на примерах действующих схем.

В ы в о д ы

1. Доказана возможность формирования также второй ГМ, полученной из уравнений узловых напряжений в форме матрицы собственных и взаимных проводимостей по алгоритму, приведенному в [3].

2. Выбранный метод решения уравнений установившегося режима электрической системы, записанный в форме частных производных на базе ГМ, исключает возможность появления отрицательного дискриминанта в процессе итерации, имеющий место при решении уравнений второго порядка [1].

3. Как показывают расчеты, при решении уравнений на базе ГМ сходимость итерации значительно ускоряется без использования специальных приемов ускорения.

АрмНИИЭ

Поступило 15.III.1978

Ա. Ա. ՀԱՐՈՒԹՅԱՆՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԵՐԻ ՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ
ՀԱՇՎԱՐԿՆԵՐՈՒՄ ՀԻՐԻԻՎԱՅԻՆ ՄԱՏՐԻՑԱՆԻ ԿԻՐԱՌՄԱՆ
ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ ՀԵՏԱՉՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Ա Վ Փ Ո Վ Ո Ւ Մ

Շարադրված է թՀՄ-ի վրա էլեկտրական համակարգի հաստատված ռեժիմների հաշվարկման մեթոդը, ալգորիթմն ու ծրագիրը Ֆիբրիդային մատրիցայի (ՀՄ) կիրառման հիման վրա: ՀՄ կիրառմամբ էներգահամակարգի հաստատված հաճախարումները լուծելիս, ինչպես ցույց են տալիս հաշվարկները, առանց հատուկ եղանակներ օգտագործելու խոհրացիայի զուգամիտումը պզալիորեն արագանում է:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Hale H. W., Goodrich R. W. Digital Computation of Power Flow-Some New Aspects. Trans. AIEE, vol. 78, 1958, pp. 919—924.
2. Адоку Г. Т. Уравнения электрических режимов энергосистемы, основанные на гибридных матрицах. «Доклады АН АрмССР», т. LV, 1972, № 3, с. 174—178.

3. Арутюнян А. А. Формирование гибридной матрицы на ЦВМ. «Известия АН АрмССР (серия Г II)», т. XXX, 1977, № 2, с. 32—38.
4. Латышева Т. С. Итерационные методы расчета режимов в электрических цепях и системах. Автореферат кандидатской диссертации, М., 1970, 26 с.
5. Адоц Г. Т. Метод расчета установившегося режима электрической системы. «Электричество», 1972, № 5, с. 1—6.
6. Адоц Г. Т. Многополюсник. Ереван, изд. АН АрмССР, 1965, 167 с.
7. Хачатрян В. С. Метод и алгоритмы расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем. «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», 1973, № 4, с. 45—56.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. Г. АЛЕКСАНДРЯН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
 ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

При использовании индукторных генераторов в импульсных режимах и особенно в системах управления, встает вопрос об исследовании их динамических характеристик. С этой точки зрения, определение устойчивости их работы при различных видах внешней нагрузки становится весьма актуальным.

Система дифференциальных уравнений индукторного генератора с пульсирующим потоком получается с периодическими коэффициентами, поэтому не всегда удастся чисто аналитически определить устойчивость ее решения, что имеет место для случая активно-индуктивной внешней нагрузки [1]. Но в случае активно-емкостной внешней нагрузки это представляет определенные математические трудности. Эту задачу можно решить с использованием численных методов на ЭВМ.

Система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в индукторном генераторе с активно-емкостной нагрузкой в матричном виде, имеет вид:

$$\frac{d\Psi}{dz} - RI = U, \quad (1)$$

где

$$\Psi = \begin{bmatrix} \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_g \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} r_b & 0 & 0 \\ 0 & r_c & 0 \\ 0 & 0 & r_g \end{bmatrix}; \quad I = \begin{bmatrix} i_b \\ i_c \\ i_g \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} u_b \\ u_c \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

I — матрица токов в обмотках возбуждения (ОВ), статора (ОС) и демфера (ОД); R — матрица активных сопротивлений ОВ (r_b), ОС (r_c) и ОД (r_g); Ψ , U — матрицы потокосцепления и напряжений.

Учитывая, что $\Psi = LI$, систему (1) можно представить в виде:

$$\frac{d\Psi}{dz} - RL^{-1}\Psi = U, \quad (3)$$

где $L = \begin{bmatrix} L_{bb} & L_{bc} & L_{bg} \\ L_{cb} & L_{cc} & L_{cg} \\ L_{gb} & L_{gc} & L_{gg} \end{bmatrix}$ — матрица индуктивностей; $L_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = b, c, g$) —

индуктивности обмоток, которые в общем случае являются функциями времени: $L_{\alpha\beta} = L_{\alpha\beta}^0(1 + m \cos \tau)$; m — глубина модуляции.

При активно-емкостной внешней нагрузке:

$$-u_c = r_u i_c + \frac{1}{c} \int i_c d\tau. \quad (4)$$

После подстановки (4) в (3) и некоторых преобразований получим систему дифференциальных уравнений возмущенного состояния в виде:

$$\frac{d\psi}{d\tau} = P\psi, \quad (5)$$

где P представляет собой периодическую квадратную матрицу вида:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ 0 & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix}.$$

Все элементы p_i матрицы P являются периодическими функциями времени и зависят от глубины модуляции m , активного (r_u) и емкостного (x_u) сопротивлений внешней нагрузки.

В тех случаях, когда известно общее решение дифференциальных уравнений (5), можно непосредственно определить значение переменных $\psi_i(\tau)$ в возмущенном состоянии, составить вариации $\Delta\psi_i(\tau) = \psi_i(\tau) - \psi_{i0}(\tau)$ и, исследуя их, решить вопрос устойчивости невозмущенного состояния $\psi_{i0}(\tau)$.

Однако в подавляющем большинстве случаев общее решение дифференциальных уравнений (5) неизвестно, поэтому этот метод практически редко может быть использован. Даже в тех случаях, когда можно построить общее решение дифференциальных уравнений (5), ответ на вопрос — устойчиво ли состояние, целесообразно искать не из анализа общего решения, а с помощью методов, специально разработанных в общей теории устойчивости движения. Эти методы основаны на качественном анализе дифференциальных уравнений возмущенного движения, которым удовлетворяют отклонения (вариации) $\Delta\psi_i$.

Исследование устойчивости систем с периодическими коэффициентами возможно произвести двумя путями:

а) преобразовать систему уравнений с периодическими коэффициентами в систему с постоянными коэффициентами [2] и далее исследовать устойчивость по хорошо разработанным критериям устойчивости движения [3];

б) исследовать устойчивость, пользуясь теорией линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами, принадлежащей Флоке [4].

Исследование устойчивости в данной задаче производится методом [4], потому что нахождение матрицы преобразования представляет определенные математические трудности.

В теории устойчивости линейных систем с периодическими параметрами [4] доказано, что имея одну фундаментальную матрицу решений в конце периода, можно составить характеристическое уравнение и определить устойчивость невозмущенного состояния. Задача облегчается тем, что критерии устойчивости носят характер неравенств, поэтому можно использовать различные приближенные методы, один из которых состоит в следующем. Задав начальные условия $\Psi(0) = E$, где E — единичная матрица, численным интегрированием уравнения (5) определяют значения линейно независимых решений в конце периода 2π :

$$\psi_1 = \begin{pmatrix} \psi_{11} \\ \psi_{21} \\ \psi_{31} \\ \psi_{41} \end{pmatrix}, \dots, \psi_4 = \begin{pmatrix} \psi_{14} \\ \psi_{24} \\ \psi_{34} \\ \psi_{44} \end{pmatrix}.$$

На основании этих решений составляется матрица $\Psi(2\pi) = A$. Так как интегрирование нужно производить только в промежутке $(0, 2\pi)$, то можно получить достаточно высокую точность. По найденной матрице $A = \Psi(2\pi)$ составляется характеристическое уравнение, определяются корни $\lambda_1, \dots, \lambda_4$ и по их анализу делают окончательное заключение об устойчивости или неустойчивости невозмущенного состояния (при $|\rho| < 1$ невозмущенное состояние устойчиво, а при $|\rho| > 1$ — неустойчиво).

Выпускаемые Армэлектрозаводом им. В. И. Ленина индукторные генераторы с пульсирующим потоком имеют достаточно широкий разброс параметров индуктивностей обмоток. Значения этих параметров входят в коэффициенты системы дифференциальных уравнений (5), поэтому для определения устойчивости решений необходимо данную задачу решать для каждой конкретной машины. Чтобы упростить эту трудоемкую задачу, составлена инженерная методика расчета устойчивости, сущность которой заключается в следующем: имея конкретную матрицу индуктивностей, вводим ее в ЭВМ и на основании составленной программы получаем значения корней характеристического уравнения.

Расчеты производятся для широкого диапазона изменения активного (r_n), емкостного (x_n) сопротивлений и глубины модуляции (m). Результаты расчета для одного значения $m = 0,8$ приведены в таблице. Такие расчеты проводились для значений $0,6 \leq m \leq 1,0$.

Таблица

$\cos \alpha$	β_1	β_2	β_3	β_4
0	$0,981 + 0,161$	$0,981 - 0,161$	$0,618 + 0,753$	$0,618 + 0,753$
0,1	$0,619 + 0,753$	$0,619 - 0,753$	$0,773 + 0,112$	$0,773 - 0,112$
0,2	$0,62 + 0,754$	$0,62 - 0,754$	$0,612 + 0,037$	$0,612 - 0,037$
0,3	$0,62 + 0,755$	$0,62 - 0,755$	$0,527 + 0,04$	$0,527 - 0,04$
0,4	$0,62 + 0,756$	$0,62 - 0,756$	$0,375 + 0,048$	$0,375 - 0,048$
0,5	$0,62 - 0,756$	$0,62 - 0,756$	$0,278 + 0,106$	$0,278 - 0,106$
0,6	$0,619 - 0,7565$	$0,619 - 0,7565$	$0,184 + 0,141$	$0,184 - 0,141$
0,7	$0,619 + 0,7564$	$0,619 - 0,7564$	$0,088 + 0,161$	$0,088 - 0,161$
0,8	$0,618 + 0,756$	$0,618 - 0,756$	$-0,011 + 0,144$	$-0,011 - 0,144$
0,9	$0,617 + 0,755$	$0,617 - 0,755$	$-0,097 + 0,059$	$-0,097 - 0,059$
1,0	$0,615 - 0,757$	$0,615 - 0,757$	1,000	0,008

Исследования показали, что для широкого диапазона изменения вышеуказанных параметров решения системы дифференциальных уравнений (5) остаются устойчивыми. На основании этих заключений приходим к выводу, что индукторные генераторы с пульсирующим током с большой надежностью можно использовать в системах автоматического управления.

ЕрIII им. К. Маркса

Поступило 14.IX.1978

Վ. Գ. ԱԼԵՔՍԱՆԴՐԻԱՆ

ԻՆՏԵԼԵԿՏՈՐԱԿԱՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ՈՐԴԵՍ ՂԵՎԱՎԱՐՄԱՆ ՕՐՅԵԿՏԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. ի. մ.

Հետազոտվում է ինդուկտորային գեներատորի աշխատանքի կայունությանը ակտիվ-ունակային արտաքին բեռի դեպքում:

Կախված ինդուկտորային գեներատորի կառուցվածքային առանձնահատկություններից, ղեկավարման օբյեկտի դիֆերենցիալ համասարումները ստացվում են պարբերական դործուկիցներով: Պարբերական գործակիցներով դժային չորրորդ կարգի դիֆերենցիալ համասարումների համակարգի կայունության որոշումը կատարվում է Ֆլոկիի մեթոդով: Բնութագրական համասարման արժատների անալիզը, որոնք ստացվում են էՀՄ-ի վրա համակարգի թվային լուծումից մեկ պարբերության վերջում, պատասխանում են դրված հարցին:

Բերվում է խժեռերական մեթոդիկա, կազմելու խոսքային ալգորիթմը, որի միջոցով որոշվում է կոնկրետ ինդուկտորային գեներատորի կայունությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арешян Г. Л., Александрян В. Г. Определение устойчивости решения дифференциальных уравнений индукторного генератора с пульсирующим током. Науч. тр. ЕрПИ, т. 36, вып. IV, Ереван, изд. ЕрПИ, 1972.
2. Еручин Н. Н. Приводимые системы. Минск, «Наука и техника», 1966.
3. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. М., «Наука», 1967.
4. Меркин Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения. М., «Наука», 1971.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

О. Н. ГАСПАРЯН, Г. Г. ЕГИАЗАРЯН

О ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ МНОГОСВЯЗНЫХ
СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ

Среди систем автоматического управления важный и широкий класс составляют многосвязные системы. К этому классу относятся электромеханические счетно-решающие устройства, системы углового сопровождения радиоантенн, пространственной ориентации и стабилизации летательных аппаратов и ряд других [1—4]. При этом наиболее часто встречаются системы, которые характеризуются жесткими взаимными связями между сепаратными (отдельными) каналами или связями, передаточные функции которых отличаются только коэффициентами передачи [4].

Указанным системам соответствует матричная структурная схема, приведенная на рис. 1, где $R = \|r_{ij}\|$, $M = \|m_{ij}\|$ — квадратные матрицы взаимных связей; $\text{diag}\{W_i(p)\}$ — диагональная матрица передаточных функций сепаратных каналов; $\bar{\varphi}_{\text{вх}}(p)$, $\bar{\varphi}_{\text{вых}}(p)$, $\bar{\varepsilon}(p)$ — изображения по Лапласу векторов входа, выхода и ошибки системы, соответственно.

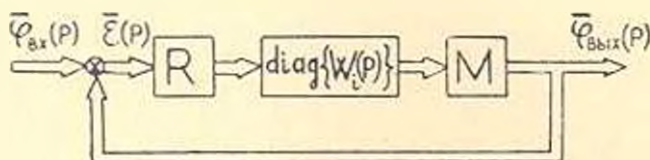


Рис. 1.

Впервые вопросы точности многосвязных систем были рассмотрены в работе [9]. В дальнейшем они получили обобщение в [1—3]. Однако в этих работах в выражении вектора ошибки системы отсутствует явная связь с параметрами сепаратных каналов и матрицами взаимных связей. Поэтому практическое использование результатов, приведенных в [1—3, 9], крайне затруднительно, а в некоторых случаях невозможно. Результаты, лишенные указанных недостатков для систем с одинаковым порядком астатизма и сепаратных каналов, получены в работе [5], где предложена методика определения матрицы коэффициентов ошибок по аналогии с методикой Л. Г. Кинга для одномерных систем. Приведенные в [5] формулы просты и выражаются в явном

виде через параметры системы, но для матриц высших коэффициентов ошибок являются приближенными.

В данной статье проводится строгий анализ точности трехканальной следящей системы (ТСС) с жесткими взаимными связями между сепаратными каналами, передаточные функции которых имеют произвольный вид.

Рассмотрим взаимосвязанную ТСС с порядком астатизма $r \geq 1$ в сепаратных каналах. Матричная структурная схема системы приведена на рис. 1. Передаточные функции сепаратных каналов $W_i(p)$ ($i = 1, 2, 3$) различны и имеют в общем случае вид

$$W_i(p) = \frac{\sum_{k=1}^m a_k p^k}{\sum_{k=1}^n b_k p^k}, \quad m \leq n, \quad (1)$$

где в зависимости от порядка астатизма этих каналов соответствующие коэффициенты b_k равны нулю.

Матричная передаточная функция системы по ошибке равна [1]

$$\Phi_e(p) = [I + M \operatorname{diag} \{W_i(p)\} R]^{-1}. \quad (2)$$

Согласно [2], [5] выражение (2) при малых p можно представить в виде

$$\Phi_e(p) = \sum_{i=0}^{\infty} C_i p^i, \quad (3)$$

где C_i — матрицы коэффициентов ошибок ТСС по отношению к $\bar{\varphi}_{\text{вх}}(p)$. С учетом (3) изображение вектора ошибки ТСС равно

$$\bar{\varepsilon}(p) = \Phi_e(p) \bar{\varphi}_{\text{вх}}(p) = \left[\sum_{i=0}^{\infty} C_i p^i \right] \bar{\varphi}_{\text{вх}}(p). \quad (4)$$

Применяя к выражению (4) обратное преобразование Лапласа, получим оригинал

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=0}^{\infty} C_i \frac{d^i \bar{\varphi}_{\text{вх}}(t)}{dt^i}. \quad (5)$$

Таким образом, вектор ошибки системы может быть определен, если известен вектор входного воздействия $\bar{\varphi}_{\text{вх}}(t)$, его производные и матрицы коэффициентов ошибок C_i . Матрицы C_i можно вычислить при помощи рекуррентных соотношений [5]

$$C_0 = \lim_{p \rightarrow 0} [\Phi_e(p)], \quad (6)$$

$$C_i = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{p^i} \left[\Phi_e(p) - \sum_{j=0}^{i-1} C_j p^j \right], \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Перейдем к определению матрицы коэффициентов ошибок C_i . Для этого преобразуем матричную структурную схему исходной системы (рис. 1) к эквивалентному виду (рис. 2).

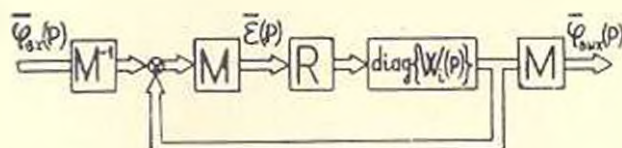


Рис. 2.

В этом случае матричная передаточная функция по ошибке равна

$$\Phi_i(p) = M [I + \text{diag}\{W_i(p)\} R M]^{-1} M^{-1}. \quad (7)$$

Представим выражение (7) в виде произведения двух матриц, одна из которых диагональная [1], [5]:

$$\Phi_i(p) = M U^{-1}(p) \text{diag} \left\{ \frac{1}{1 + m_{ii} r_{ii} W_i(p)} \right\} M^{-1}, \quad (8)$$

где матрица $U(p)$ равна $U(p) = [u_{ij}(p)]$.

Здесь

$$[u_{ij}(p)] = \begin{cases} \frac{1 + W_i(p) \sum_{k=1}^3 r_{ik} m_{kj}}{1 + m_{ii} r_{ii} W_i(p)}, & i = j, \\ \frac{W_i(p) \sum_{k=1}^3 r_{ik} m_{kj}}{1 + m_{ii} r_{ii} W_i(p)}, & i \neq j, \end{cases} \quad (9)$$

$i, j = 1, 2, 3$

Предел матрицы $U^{-1}(p)$ при $p \rightarrow 0$ существует и равен

$$U^{-1}(0) = M^{-1} R^{-1} \text{diag}\{r_{ii} m_{ii}\}. \quad (10)$$

После подстановки (8) в (6) получим

$$C_0 = \lim_{p \rightarrow 0} \left[M U^{-1}(p) \text{diag} \left\{ \frac{1}{1 + m_{ii} r_{ii} W_i(p)} \right\} M^{-1} \right], \quad (11)$$

$$C_i = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{p^i} \left[M U^{-1}(p) \text{diag} \left\{ \frac{1}{1 + m_{ii} r_{ii} W_i(p)} \right\} M^{-1} \sum_{l=0}^{i-1} C_l p^l \right],$$

$i = 1, 2, 3, \dots$

Отметим, что представление матричной передаточной функции исходной системы (2) в виде

$$\Phi_i(p) = v^{-1}(p) \operatorname{diag} \left\{ \frac{1}{1 + m_{ii} r_{ii} W_i(p)} \right\}$$

невозможно, т. к. матрица $v^{-1}(p)$ не имеет конечного предела при $p \rightarrow 0$.

Очевидно, первые r матриц коэффициентов ошибок в выражении (11) равны нулю, где r — наименьший порядок астатизма отдельных каналов стабилизации.

Определим первую отличную от нуля матрицу C_r

$$C_r = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{p^r} \left\{ M [J + \operatorname{diag} \{ W_i(p) \} R M]^{-1} - \sum_{i=0}^{r-1} C_i p^i \right\} = \\ = M U^{-1}(0) \operatorname{diag} \{ C_{ri} \} M^{-1}, \quad (12)$$

где $\operatorname{diag} \{ C_{ri} \}$ — диагональная матрица r -ых коэффициентов ошибок системы, полученной из исходной взаимосвязанной ТСС приравниванием нулю всех коэффициентов взаимных связей ($r_{ij} = m_{ij} = 0$ при $i \neq j$).

Аналогичным образом определим матрицу C_{r+1}

$$C_{r+1} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{p^{r+1}} \left\{ M U^{-1}(p) \operatorname{diag} \left\{ \frac{1}{1 + m_{ii} r_{ii} W_i(p)} \right\} M^{-1} - \right. \\ \left. - M U^{-1}(0) \operatorname{diag} \{ C_{ri} \} M^{-1} p^r \right\} = \\ = M \left[U^{-1}(0) \operatorname{diag} \{ C_{r+1i} \} + \left(\frac{dU^{-1}(p)}{dp} \right)_{p=0} \operatorname{diag} \{ C_{ri} \} \right] M^{-1}. \quad (13)$$

Можно показать, что в общем случае матрица C_{r+k} имеет вид

$$C_{r+k} = M \left[U^{-1}(0) \operatorname{diag} \{ C_{r+k,i} \} + \right. \\ \left. + \sum_{q=1}^k \frac{1}{q!} \left(\frac{d^q U^{-1}(p)}{dp^q} \right)_{p=0} \operatorname{diag} \{ C_{r+k-q,i} \} \right] M^{-1}, \quad (14) \\ k = 1, 2, 3, \dots$$

где матрица $\operatorname{diag} \{ C_{r+k,i} \}$ определяется так же, как и $\operatorname{diag} \{ C_{ri} \}$ в выражении (12).

Производные матрицы $U^{-1}(p)$ в точке $p = 0$ определяются из (9) следующими рекуррентными формулами

$$\left(\frac{dU^{-1}(p)}{dp} \right)_{p=0} = M^{-1} R^{-1} \operatorname{diag} \left\{ \frac{b_{ii}}{a_{ii}} \right\} M^{-1} R^{-1} (R M - \operatorname{diag} r_{ii} m_{ii}),$$

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{d^j U^{-1}(\rho)}{d\rho^j} \right)_{\rho=0} &= \delta! M^{-1} R^{-1} \operatorname{diag} \left\{ \frac{1}{a_{0i}} \right\} \left[\operatorname{diag} \{b_{0i}\} M^{-1} R^{-1} (RM - \right. \\
 &\quad \left. - \operatorname{diag} \{r_{ii} m_{ii}\}) - \sum_{j=1}^{\delta-1} (\operatorname{diag} \{d_{0-i-j}\} RM + \right. \\
 &\quad \left. + \operatorname{diag} \{b_{i-j}\}) \frac{1}{j!} \left(\frac{d^j U^{-1}(\rho)}{d\rho^j} \right)_{\rho=0} \right]. \\
 \delta &= 2, 3, 4, \dots
 \end{aligned} \tag{15}$$

Таким образом, выражения (10), (12), (14) и (15) полностью определяют матрицы коэффициентов ошибок взаимосвязанной ТСС с различными передаточными функциями отдельных каналов через параметры этих каналов и матрицы взаимных связей.

Очевидно, полученные выражения справедливы и для систем с произвольным числом отдельных каналов ($i = 1, 2, \dots, k$).

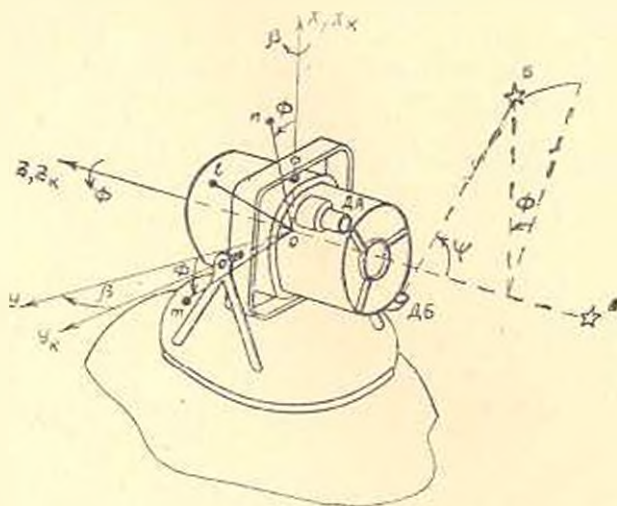


Рис. 3.

В качестве примера рассмотрим ТСС орбитальной астрофизической обсерватории «Орion-2» [10]. На рис. 3 приведена кинематическая схема телескопа обсерватории. Измерение его отклонений относительно инерциального пространства осуществляется с помощью двух опорных звезд А и Б, расположенных под углом $\psi = 63^\circ$.

На звезду А, которая находится в центре исследуемой области, наводится двухкоординатный датчик ДА с полудисковым модулятором светового потока, а на звезду Б — однокоординатный датчик ДБ с анализаторной призмой [10]. Наведение ДБ на звезду Б производится разворотом телескопа относительно оптической оси ОЗ на угол захвата Φ . На рис. 3 через α и β обозначены углы наведения телескопа на иссле-

дую звезду A , а через Ox , Oy и Oz — оси чувствительности датчиков.

Структурная схема ТСС обсерватории «Орион-2» показана на рис. 4.

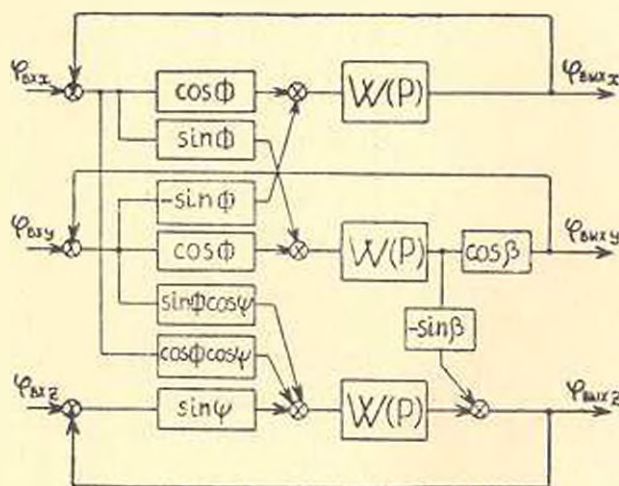


Рис. 4.

Здесь через $W(p)$ обозначены передаточные функции отдельных каналов, а входные воздействия $\varphi_{вхx}(t)$, $\varphi_{вхy}(t)$, $\varphi_{вхz}(t)$, действующие на ТСС телескопа, являются линейно изменяющимися функциями времени $\varphi_{вхx}(t) = \varphi_{вхy}(t) = \varphi_{вхz}(t) = \Omega t$ ($\Omega = 0,01^\circ/c$) [7]. Сепаратные каналы стабилизации имеют первый порядок астатизма и добротности по скорости $K_0 = 120^{1/c}$.

Матрицы взаимных связей R и M , обусловленные несовпадением осей чувствительности датчиков с осями стабилизации $OYXZ$ телескопа и неортогональностью осей карданова подвеса, равны

$$R = \begin{bmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi & 0 \\ \sin \Phi & \cos \Phi & 0 \\ \cos \Phi \cos \psi & \sin \Phi \cos \psi & \sin \psi \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & -\sin \beta & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

В соответствии с полученными выше результатами матрица C тождественно равна нулю. Кроме того, учитывая, что производные вектора входного воздействия $\frac{d^n \bar{\varphi}_{вх}(t)}{dt^n}$ при $i \geq 2$ также равны нулю, вектор установившейся скоростной ошибки можно записать в виде

$$\bar{\varepsilon} = C_1 \frac{d \bar{\varphi}_{вх}(t)}{dt} = \frac{1}{K_0} R^{-1} M^{-1} \frac{d \bar{\varphi}_{вх}(t)}{dt}. \quad (17)$$

ГДО

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \Phi & \sin \Phi & 0 \\ -\sin \Phi & \cos \Phi & 0 \\ \frac{\sin^2 \Phi - \cos^2 \Phi}{\operatorname{tg} \beta} & \frac{2 \sin \Phi \cos \Phi}{\operatorname{tg} \beta} & \frac{1}{\sin \beta} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos \beta} & 0 \\ 0 & \operatorname{tg} \beta & 1 \end{bmatrix}.$$

Из развернутой структурной схемы (рис. 4) следует, что движения телескопа относительно поперечных осей X и Y являются возмущениями для канала стабилизации Z , причем, обратное влияние отсутствует. Это позволяет представить вектор $\bar{\varepsilon}_1$ ошибки поперечных каналов X, Z на основании (18) в виде

$$\bar{\varepsilon}_1 = \frac{1}{K_z} R_1^{-1} M_1^{-1} \frac{d\bar{\varphi}_{ax_1}(t)}{dt}, \quad (19)$$

где (2×2) — матрицы R_1^{-1} и M_1^{-1} получаются из (18) вычеркиванием последних строк и столбцов, а векторы $\bar{\varepsilon}_1$ и $\bar{\varphi}_{ax_1}(t)$ равны

$$\bar{\varepsilon}_1 = [\varepsilon_x, \varepsilon_y], \quad \bar{\varphi}_{ax_1}(t) = [\varphi_{ax_y}(t), \varphi_{ax_z}(t)].$$

Матрица R_1^{-1} в (19) является матрицей ортогонального преобразования [6] и сохраняет при умножении на векторы их модули.

Поэтому, переходя в (19) к модулям, получим

$$\begin{aligned} |\bar{\varepsilon}_1| &= \frac{1}{K_z} \left| R_1^{-1} M_1^{-1} \frac{d\bar{\varphi}_{ax_1}(t)}{dt} \right| = \frac{1}{K_z} \left| M_1^{-1} \frac{d\bar{\varphi}_{ax_1}(t)}{dt} \right| \leq \\ &\leq \frac{1}{K_z} \|M_1^{-1}\| \left| \frac{d\bar{\varphi}_{ax_1}(t)}{dt} \right| = \frac{2\sqrt{2}}{K_z} \sec \beta, \end{aligned} \quad (20)$$

где через $\|M_1^{-1}\| = \sec \beta$ обозначена спектральная норма матрицы M_1^{-1} [8].

Полученное выражение (20) позволяет сделать вывод, что модуль вектора ошибки поперечных каналов X и Y не зависит от угла захвата Φ опорной звезды B , а зависимость от угла β наведения телескопа на исследуемую звезду A определяется функцией $\sec \beta$.

Подставив в (20) численные значения $2 = 0,01^\circ/c = 36''/c$, $K_z = 120^\circ/c$, $\beta = 15^\circ$, получим $|\bar{\varepsilon}_1| \leq 0,44''$.

Рассмотрим канал стабилизации Z . Если обозначить третью строку матрицы R^{-1} (18) через $\bar{r}$, то для ошибки ε_z можно записать

$$|\varepsilon_z| = \frac{1}{K_z} \left| \left\langle \bar{r}, M^{-1} \frac{d\bar{z}_m(t)}{dt} \right\rangle \right| \leq \frac{1}{K_z} |\bar{r}| \cdot \|M^{-1}\| \cdot \left| \frac{d\bar{z}_m(t)}{dt} \right| = \\ = \frac{\Omega \sqrt{3}}{K_z} \left(\frac{1 + \cos^2 \varphi}{\sin \varphi} \right) \left(\frac{1 + |\sin \beta|}{\cos \beta} \right), \quad (21)$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ — символ скалярного произведения, $\|M^{-1}\| = \frac{\sqrt{1 + |\sin \beta|}}{\cos \beta}$ — спектральная норма матрицы M^{-1} , а $|\bar{r}| = \frac{1 + \cos^2 \varphi}{\sin \varphi}$ — модуль вектора $\bar{r}$.

В выражении (21) использовано известное неравенство Коши — Шварца [8].

Как видно из (21), ошибка канала Z также не зависит от угла Φ . Подставив в (21) численные значения, найдем $\varepsilon_z < 0.665''$.

Таким образом, применение полученных выражений в сочетании с аппаратом функционального анализа позволило произвести анализ точности и выявить основные кинематические особенности ТСС обсерватории «Орион-2».

Поступило 20.VII.1974

О. А. РАУФБЕКЯН, Г. А. БУРДУКЯН

ԲԱԶՄԱԿԱՊ ՀԵՏԵՎՈՂ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԴՐՈՒՄԻ ՃՇԳՐՏՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա. Ռ. Փ. Ո. Փ. Ո. Փ.

Դիտվում է Երեքկանալային հեռուգ համակարգ առանձին կանալներում տարրեր փոխանցման ֆունկցիաներով և կոշտ փոխադարձ կապերով, Հետադիտվում է փոխադարձ կապերի ազդեցությունը համակարգի դինամիկ ճշգրտության վրա:

Տարածելով Լ. Գ. Քինդի մեթոդիկան բազմակապ համակարգերի վրա, ստացված են սխալների դորմակիցների մատրիցաները, որոնք բացահայտ տեսքով արտահայտված են համակարգի պարամետրերի և փոխադարձ կապերի մատրիցաների միջոցով:

Որպես օրինակ բերվում է «Օրիոն-2» ուղեծրային աստղադիտարանի եռառանցք հեռուգ համակարգի դինամիկ ճշգրտության անալիզը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Морозовский В. Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. М., «Энергия», 1970.
2. Бранчук Е. Н. Взаимосвязанные и многоконтурные регулируемые системы. Л., «Энергия», 1968.
3. Месров М. В. Системы многосвязного регулирования. М., «Наука», 1965.
4. Соболев О. С. Однотипные связанные системы регулирования. М., «Энергия», 1973.
5. Гаспарян О. Н. Анализ точности взаимосвязанных систем регулирования. «Промышленность Армении», 1974, № 9.
6. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М., «Наука», 1966.
7. Лисович И. М. и др. К вопросу оценки области применения газореактивных систем угловой стабилизации космических аппаратов. Со «Управление в пространстве», т. 1, М., «Наука», 1973.
8. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М., «Наука», 1972.
9. Golomb M., Usdin E. A. A theory of multidimensional servo system. J. Franklin. Ins., № 1, 1952.
10. Gurradyan G. A. et all. Space astrophysical observatory „Orion-2“. „Astrophis. Space Sci“, 46, 1976.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Г. С. ОРДУЯН, Л. О. ЖАМГАРЯН

СОВМЕСТИМОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН СЕРИИ
«УРАЛ» И ЕС ЭВМ ПО ВВОДУ

Описывается устройство преобразования кода КПК-12 в код «3 из 6», позволяющее ввод информации с перфокарт в ЭВМ «Урал-14» вести в коде, принятом для машин серии ЕС ЭВМ.

За последние несколько лет вычислительные машины III поколения прочно вошли в машинные парки вычислительных центров, и представить современный ВЦ без машины серии ЕС почти невозможно. Многие ВЦ стараются приобрести машины типа ЕС, переводят нагрузку целиком на них, оставляя недогруженными (или вообще без нагрузки) морально устаревшие машины II поколения. Это наносит большой ущерб народному хозяйству, т. к. создается искусственный дефицит машин ЕС ЭВМ и простаивают машины стоимостью несколько сот тысяч рублей. Между тем машины II поколения могут еще долго прослужить и дать значительный экономический эффект даже при наличии в том же ВЦ машины типа ЕС.

Эффективность и польза старых машин особенно наглядна в случае, если в систему их математического обеспечения входит транслятор с какого-либо алгоритмического языка (АЛГОЛ, ФОРТРАН, КОБОЛ и т. д.). Многие из них обладают этим преимуществом («Раздан-3», «Урал-14, -16», «Минск-32» и т. д.). Это в большей мере относится к ЭВМ серии «Урал», в которых реализованы многие идеи, присущие машинам III поколения (модульный принцип формирования ячеек, защита памяти, система прерываний и т. д.), и их скорее следует считать машинами «2.5 поколения».

В настоящей статье речь пойдет об ЭВМ «Урал-14», имеющей транслятор ФОРТРАН IV, разработанный в АННЖТ. Так как большинство заказчиков требует программы задач и перфокарты, составленные на языке машин серии ЕС, то разработчику программы приходится налаживать и решать задачу сначала на ЭВМ «Урал-14» (у которой принят входной код перфокарт «3 из 6»), потом заново перебивать перфокарты (в некоторых случаях до несколько тысяч карт) в код КПК-12 (входной код машин ЕС), затем отлаживать ту же задачу на машине ЕС, арендуя дорогое машинное время, и только после этого выдавать заказчику задачу.

Как видно, такая методика работы довольно неэкономична. Целесообразнее разработать устройство преобразования кода КПК-12 в код «3 из 6», и ввод информации в ЭВМ «Урал-14» вести в коде, принятом для машин серии ЕС. В этом случае второй этап подготовки задач отпадает, т. к. появляется возможность ввода информации в ЭВМ «Урал-14» с тех же перфокарт, подготовленных для машин серии ЕС ЭВМ на языке ФОРТРАН. Кроме того, исчезают недостатки, связанные с вводом перфокарт в коде «3 из 6» [1].

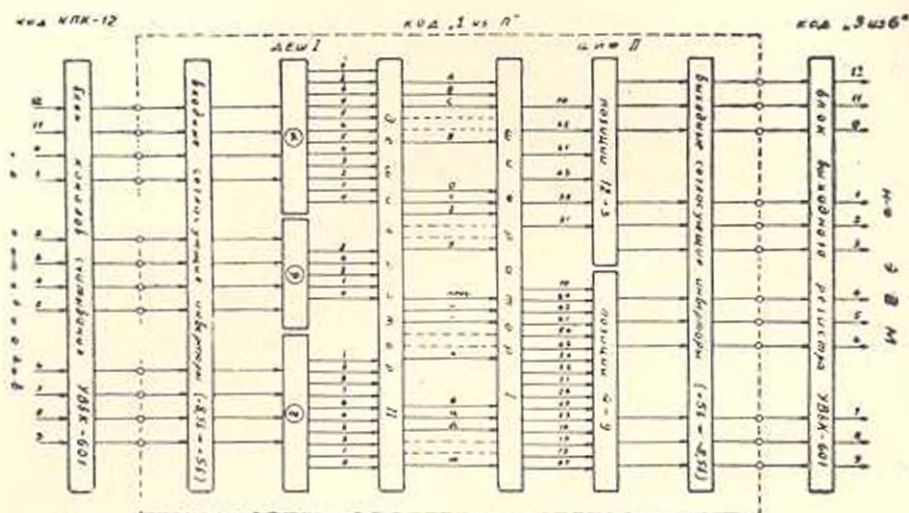


Рис. 1. Блок-схема устройства преобразования кода КПК-12 в код «3 из 6».

С этой целью разработано и изготовлено устройство (рис. 1), позволяющее преобразовать код КПК-12 в «3 из 6» и осуществить ввод перфокарт в ЭВМ «Урал-14» непосредственно в коде КПК-12, не исключая также возможности ввода в коде «3 из 6». Устройство функционально состоит из двух основных частей: дешифратора, преобразующего код КПК-12 в «1 из п», и шифратора, преобразующего код «1 из п» в «3 из 6».

За основу принят алфавит базисного ФОРТРАНа, состоящий из 47 символов (26 латинских букв, 10 цифр и 11 знаков), дополненный 20-ю буквами русского алфавита, используемыми в ФОРТРАНе для комментариев (табл.).

Устройство преобразования кодов работает следующим образом. В устройстве ввода с перфокарт УВК-601 [2] разрываются цепи, по которым снимаемая с фотодиодов информация от 12 позиций каждой колонки перфокарты после усилителей-формирователей (ячейки 2УФ-1) и инверторов (ячейки 4И или 4ИМ) поступает в блок выходного регистра (потенциальные входы диодно-трансформаторных клапанов импульсных усилителей—ячейки У). Так как логические уровни элементов УВК-601 (0в—«1», — 8,5 в — «0») и устройства преобразования ко-

Таблица

Алфавит ФОРТРАНа в кодах КПК-12 и .3 из 6

Символ		Код КПА-12		Код .3 из 6*	
		16-й	Код перфокарт	8-й	Код перфокарт
Л А Т И Н С К И Й А Л Ф А В И Т	A	900	12—1	7043	12—11—0—4—8—9
	B	880	12—2	7062	12—11—0—4—5—8
	C	840	12—3	3161	11—0—3—4—5—9
	D	820	12—4	3151	11—0—3—4—6—7
	E	810	12—5	7025	12—11—0—5—7—9
	F	808	12—6	3243	11—0—2—4—8—9
	G	804	12—7	3261	11—0—2—4—5—9
	H	802	12—8	7015	12—11—0—6—7—9
	I	801	12—9	3262	11—0—2—4—5—8
	J	500	11—1	3223	11—0—2—5—8—9
	K	480	11—2	7032	12—11—0—5—6—8
	L	440	11—3	3261	11—0—2—4—5—7
	M	420	11—4	7034	12—11—0—5—6—7
	N	410	11—5	3225	11—0—2—5—7—9
	O	408	11—6	7016	12—11—0—6—7—8
	P	404	11—7	3143	11—0—3—4—8—9
	Q	402	11—8	3226	11—0—2—5—7—8
	R	401	11—9	3207	11—0—2—7—8—9
	S	280	0—2	3270	11—0—2—4—5—6
	T	240	0—3	3162	11—0—3—4—5—8
	U	220	0—4	3231	11—0—2—5—6—9
	V	210	0—5	3232	11—0—2—5—6—8
	W	208	0—6	3213	11—0—2—6—8—9
	X	204	0—7	3125	11—0—3—5—7—9
	Y	202	0—8	3123	11—0—3—5—8—9
	Z	201	0—9	3234	11—0—2—5—6—7
Ц И Ф Р Ы	0	200	0	4343	12—2—3—4—8—9
	1	100	1	4361	12—2—3—4—5—9
	2	080	2	4362	12—2—3—4—5—8
	3	040	3	4323	12—2—3—5—8—9
	4	020	4	4364	12—2—3—4—5—7
	5	010	5	4325	12—2—3—5—7—9
	6	008	6	4326	12—2—3—5—7—8
	7	004	7	4307	12—2—3—7—8—9
	8	002	8	4370	12—2—3—4—5—6
	9	001	9	4331	12—2—3—5—6—9

Продолжение таблицы

Символ		Код КПК-12		Код из 6*	
		16-й	Код перфокарт	8-й	Код перфокарт
З Н А К И	проб	000		4354	12-2-3-4-6-7
	—	400	11	4313	12-2-3-6-8-9
	.	842	12-3-8	6143	12-11-3-4-8-9
	(	812	12-5-8	6132	12-11-3-5-6-8
	+	800	12-6-8	4332	12-2-3-5-6-8
	*	422	11-4-8	6225	12-11-2-5-7-9
	)	412	11-5-8	6113	12-11-3-6-8-9
	/	300	0-1	6161	12-11-3-4-5-9
	.	242	0-3-8	4334	12-2-3-5-6-7
	'	012	5-8	6116	12-11-3-6-7-8
	-	000	6-8	6123	12-11-3-5-8-9
Р У С С К И Й	Б	482	12-11-0-2-8	7061	12-11-0-4-5-9
	Ц	442	12-11-0-3-8	3126	11-0-3-5-7-8
	Д	422	12-11-0-4-8	7064	12-11-0-4-5-7
	Ф	400	12-11-0-6-8	3164	11-0-3-4-5-7
	Г	406	12-11-0-7-8	7023	12-11-0-5-8-9
	И	043	12-0-3-8-9	7070	12-11-0-4-5-6
	Й	023	12-0-4-8-9	7031	12-11-0-5-6-9
	Л	001	12-0-6-8-9	7013	12-11-0-6-8-2
	У	643	11-0-3-8-9	3133	11-0-3-5-8-9
	Ж	623	11-0-4-8-9	7026	12-11-0-5-7-8
А Л Ф А В И Т	Ь	901	11-0-6-8-9	3132	11-0-3-5-6-8
	Ы	607	11-0-7-8-9	3113	11-0-3-6-8-9
	З	483	12-11-0-2-8-9	7007	12-11-0-7-8-6
	Ш	443	12-11-0-3-8-9	3170	11-0-3-4-5-6
	Э	423	12-11-0-4-8-9	3134	11-0-3-5-6-7
	Щ	413	12-11-0-5-8-9	3131	11-0-3-5-6-9
	Ч	401	12-11-0-6-8-9	3107	11-0-3-7-8-9
	П	223	12-11-5-8-9	7054	12-11-0-4-6-7
	Я	213	22-11-5-8-9	3116	11-0-3-6-7-8
	Ю	302	12-11-0-8	3115	11-0-3-6-7-9

дов (+5 — «1», 0в — «0») не совпадают, то информация из блока каналов считывания по 12 каналам сначала поступает на 12 входных согласующих инверторов (рис. 2, а), которые приводят входные потенциалы к виду, приемлемому в устройстве преобразования кодов. Далее информация с выхода согласующих инверторов поступает на вход дешифратора

С целью сокращения числа используемых элементов применен двухступенчатый дешифратор. Первая ступень состоит из трех идентичных дешифраторов α , β и γ , собранных на четырехходовых схемах совпадения «И». На входы каждого из них поступает информация с четырех последовательных позиций перфокарты: на дешифратор α — с позиций 12, 11, 0, 1, на β — 2, 3, 4, 5 и на γ — 6, 7, 8, 9. Соответственно этому, каждый символ кода КПК-12 выражается трехзначным шестнадцатеричным числом (см. табл. левый столбец кода КПК-12) в виде

$$z = \alpha \cdot 16^2 + \beta \cdot 16^1 + \gamma \cdot 16^0,$$

где z — трехзначное шестнадцатеричное число: α , β , γ — шестнадцатеричные цифры.

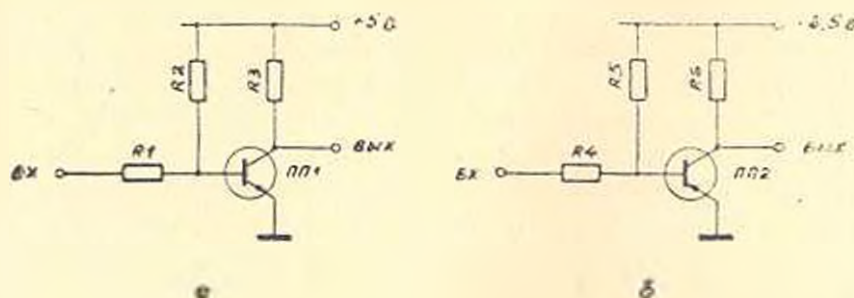


Рис. 2. Принципиальные схемы входных (а) и выходных (б) согласующих инверторов. $R1 = 8,2 \text{ к}$, $R2 = 6,2 \text{ к}$, $R3 = 1,2 \text{ к}$, $R4 = 2,4 \text{ к}$, $R5 = 9,1 \text{ к}$, $R6 = 1,8 \text{ к}$. ПП1 — транзистор КТ603А, ПП2 — транзистор МП25Б.

Шестнадцатеричные цифры старше 9 обозначены соответствующими десятичными цифрами с точкой. Например, цифра «четырнадцать» обозначена в виде 4. Старший разряд α дешифрирует 12 цифр (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 0, 2, 4), β — 5 цифр (0, 1, 2, 4, 8) и младший γ — 10 цифр (0, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 0, 1). Остальные цифры в принятом алфавите ФОРТАНа не используются.

Выходные сигналы положительной полярности дешифратора I ступени поступают на вход дешифратора II ступени. Здесь использованы 67 (соответственно числу символов) трехходовых схем совпадения «И», на выходе которых получается информация в коде «1 из п». При поступлении на вход дешифратора кода любого из используемых символов на выходе элемента соответствующего символа получается низкий уровень сигнала, т. е. логический «0». Остальные все 66 элементов на выходе будут иметь высокий уровень, т. е. логическую «1» (возбуждена только одна выходная шина).

Код «1 из п» легко шифруется в любой желаемый код. По условиям нашей задачи его надо зашифровать в код «3 из 6», принятый в машине «Урал-14». Этот процесс осуществляется шифратором, также состоящим из двух ступеней.

В шифраторе I степени использовано то обстоятельство, что в первых шести позициях перфокарты (12, 11, 0, 1, 2, 3) или старших двух восьмеричных разрядах символов кода «3 из 6» встречаются всего лишь 6 различных комбинаций, а именно: 70, 62, 61, 43, 32 и 31, а во вторых шести двоичных (или младших двух восьмеричных) разрядах (позиции 4, 5, 6, 7, 8, 9) — 16 различных комбинаций: 70, 64, 62, 61, 54, 43, 34, 32, 31, 26, 25, 23, 16, 15, 13 и 07 (для наглядности в табл. в левом столбце кода «3 из 6» приведен восьмеричный вид символов).

На I степени шифрации схемами «ИЛИ» объединены выходы всех тех элементов символов кода «1 из п», которые повторяются в вышеперечисленных комбинациях первых и вторых шести двоичных разрядов. Таким образом, после I степени шифрации получаются 22 сигнальные шины: 6 для первых шести позиций перфокарты, 16 — для вторых шести. Выходные сигналы отрицательной полярности этих шин поступают на входы элементов шифратора II степени, реализующих логическую операцию «ИЛИ». Число элементов шифратора II степени соответствует числу позиций одной колонки перфокарты и равно 12.

В шифраторе II степени применен прием, который позволяет избавиться от необходимости использования на его выходе 12 дополнительных инверторов. Обычно, при вводе информации осуществляется запись «1» в тех разрядах выходного регистра УВК, в соответствующих позициях которых в данной колонке перфокарты имеются пробивки. В принятой схеме осуществляется запись «0» в тех разрядах, в позициях которых отсутствуют пробивки. Это, в принципе, дела не меняет. Так, например, при восьмеричном коде, равном 31 (или 011.001 в двоичном коде), для первых шести позиций надо осуществить запись «0» в разрядах 12, 1 и 2, а для вторых шести позиций — в разрядах 4, 7 и 8 выходного регистра. При этом способе шифрации выигрыш достигается еще и тем, что в позиции 1 для всех символов кода «3 из 6» имеется «0», что позволяет вести запись для первых шести позиций только двух нулей (вместо обычных трех). Поэтому в схеме преобразователя вход элемента шифратора II степени позиции 1 постоянно заземлен.

На выходе шифратора II степени сигналы получаются на уровне $+5в$ уже в коде «3 из 6». По вышеизложенным причинам подавать их на вход выходного регистра УВК-601 нельзя. Для приведения этих сигналов обратно к уровню $-8,5в$ служат 12 выходных согласующих инверторов (рис. 2, б), после которых они поступают на соответствующие входы импульсных усилителей У. Последние осуществляют запрет записи «1» в тех разрядах выходного регистра, в позициях которых отсутствуют пробивки.

Таким образом, разорванные цепи замкнулись, и в считывающее с перфокарт устройство У-216 ЭВМ «Урал-14», которое даже не «почувствует» это преобразование, введется информация в коде «3 из 6». При вводе символа, не фигурирующего в алфавите ФОРТРАНа, во всех разрядах выходного регистра (разумеется, кроме позиции 1) за-

пишутся «1», работает схема контроля кода «3 из 6» и поймает эту ошибку.

Аппаратный контроль считанной информации в коде КПК-12, осуществляемый на машинах ЕС ЭВМ, работает по следующему принципу. Схемой контроля фиксируется несуществующая комбинация, содержащая более одной пробивки в позициях 1—7 колонки. Такая ошибка маловероятна, обычно наблюдается пропадание «1», а не наоборот. Поэтому в устройстве преобразования кодов отсутствует аппаратный контроль, т. е. ошибки, превращающие одну разрешенную комбинацию в другую, схемой контроля не будут обнаружены. Так, например, если в символе * (11—4—8) пропадут позиции 4 или 8, то после преобразования получается, соответственно, символы Q (11—8) или M (11—4), разрешенные алфавитом ФОРТРАНа, и по этой причине эти ошибки не будут фиксированы схемой контроля. Ошибки такого рода можно «поймать» только синтаксическим или семантическим контролем.

Для осуществления ввода в ЭВМ «Урал-14» перфокарт в коде «3 из 6» (без преобразования) одноименные входы блока выходного регистра и выходы блока каналов считывания УВвК-601, отмеченные кружочком на рис. 1, переключаются с помощью 12 электромагнитных реле типа РЭС-9 (на схеме не показаны). Этот режим ввода задается с помощью одного единственного тумблера, который одновременно обеспечивает устройство преобразования, отключая напряжения питания —8,5в и +5в.

В заключение отметим, что с целью полной автономии осуществлена модернизация устройства подготовки данных на перфокартах М-105А (перфораторов ЭВМ «Урал-14»), что позволяет подготавливать на них перфокарты как в коде «3 из 6», так и КПК-12.

Отметим также, что предлагаемое устройство преобразования без каких-либо изменений может быть рекомендовано для других машин II поколения, имеющих транслятор ФОРТРАН и использующих в качестве вводного устройства УВвК-601.

Описанное устройство преобразования кода КПК-12 в код «3 из 6» изготовлено на интегральных схемах серии 155 (TTL-1), содержит всего 83 ИС, смонтированных на 5-и нестандартных ТЭЗ-ах ЭВМ ЕС-1030 (не считая блока реле РЭС-9 и плат согласующих инверторов, которые выполнены навесным монтажом), и успешно эксплуатируется в Армянском НИИ энергетики на вычислительной машине «Урал-14Д».

Կ. Ս. ՍՐԴՈՒՅԱՆ, Լ. Շ. ՋԱՄՋԱՐՅԱՆ

«ՈՒՐԱԼ» ԵՎ ՄԵԱՑՅԱԼ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՀԱՇՎԻԶ
ՄԵԲԵՆԱՆԵՐԻ ՀԱՄԱՏԵՂՈՒՄՆ ԸՍՏ ՄՈՒՏՔԻ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Վ

Նկարագրված է КПК-12 կողի «Ծ-ից 3» կողին ձևափոխելու մի հարմարանք, որը հնարավորություն է տալիս պերֆորատորից ինֆորմացիան «Ուրալ-14» մեքենայի մեջ մտցնել Սիսյայալ համակարգի (ЕС) ախպի էՀՄ-երի համար ընդունված կողով։ Ֆունկցիոնալ սարքի մեջ մտնում են մուտքային ու ելքային համաձայնեցնող ինվերտորները և հրկու երկաստիճանի վերձանիչները, որոնց միջոցով КПК-12 կողը ձևափոխվում է նախ «Ը-ից 1», և ապա՝ «Ծ-ից 3» կողի։

Հարմարանքը նախատեսված է ՖՈՐՏՐՈՆ-ի հիմնական նշաններին (26 լատինական տառեր, 10 թվանշան և 11 նիշ), ինչպես նաև պրիլաձևով բաղկացած տառերից տարբերվող ռուսական այբուրենի 20 տառերին համապատասխան կողերը ձևափոխելու համար։

Առաջարկված ձևափոխող հարմարանքը կարելի է կիրառել նաև երկրորդ սերնդի այն էՀՄ-երի համար, որոնք ունեն ՖՈՐՏՐՈՆ-ից թարգմանիչ և օգտագործում են ՄВК-601 սարքը։

Կողի ձևափոխման նկարագրված հարմարանքը իրականացված է 155 սերիայի (ТП-1) ինտեգրալ սխեմաների վրա և պարունակում է ընդամենը 83 էլեմենտ, որոնք մոնտաված են ЕС-1030 էՀՄ-ի հինգ ոչ-ստանդարտ ТЭЗ-երի վրա։

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ордуян Г. С., Жамгарян Л. О. Ввод информации с перфокарт в ЭВМ «Урал-14». «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXIX, № 5, 1976, с. 53—55.
2. Устройство ввода перфокарточное УВК-601. Схемы принципиальные электрические и схемы трансформаторов, Альбом № 2, 1970.

ТЕПЛОТЕХНИКА

Г. С. МЕЛИК-АЛАВЕРДЯН, В. А. ТЕРЯН, Л. Б. ТЕР-КАЗАРОВ

ВЫБОР ТИПОРАЗМЕРОВ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КАМЕР
НА ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ

При испытаниях радиоэлектронных аппаратов (РЭА) возникает задача выбора испытательной камеры. Она заключается в том, чтобы физические явления, происходящие в испытательной камере, были бы адекватны явлениям, происходящим в той среде, где должен по условиям ТУ работать РЭА.

Теплообмен РЭА в испытательной камере можно рассматривать как теплообмен внутри ограниченного пространства [1]. Однако, в [1] представлена упрощенная модель в условиях естественного охлаждения: РЭА расположен в центре камеры и имеет вид параллелепипеда; расстояние между поверхностями РЭА и внутренними стенками камеры одинаково во всех направлениях.

Рассмотрим теплообмен РЭА в испытательной камере при принудительной вентиляции (вентилятор расположен сверху камеры) в случае, когда РЭА стоит в центре на дне камеры, а расстояние между поверхностями РЭА и внутренними стенками камеры одинаково и равно b .

РЭА имеет форму параллелепипеда со стороны A , B и C . Тогда условие теплообмена РЭА в камере характеризуется уравнением

$$P = \alpha S (t_s - t_{\text{в.к.}}) + \alpha' S' (t_s - t_{\text{в.к.}}), \quad (1)$$

где P — мощность, рассеиваемая РЭА, находящимся внутри камеры, α — коэффициент теплоотдачи от всей боковой поверхности S РЭА воздуху внутри камеры:

$$S = 2A(B + C); \quad (2)$$

α' — коэффициент теплоотдачи с верхней поверхности S' РЭА:

$$S' = BC; \quad (3)$$

t_s — среднеповерхностная температура РЭА, помещенного в испытательную камеру; $t_{\text{в.к.}}$, $t_{\text{в.к.}}$, $t_{\text{в.к.}}$ — соответственно, температура воздуха внутри, на входе и выходе из камеры:

$$t_{\text{в.к.}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} \quad (4)$$

С другой стороны, мощность, рассеиваемая с поверхности РЭА, идет на повышение теплосодержания воздуха внутри камеры, т. е.

$$t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}} = \frac{P}{c_p \rho v S_f} \quad (5)$$

где c_p , ρ , v — соответственно, теплоемкость, плотность и скорость воздуха, находящегося внутри камеры; S_f — площадь поперечного сечения канала внутри камеры, через который проходит воздух:

$$S_f = 2b(C + B) + 4b^2. \quad (6)$$

Решая совместно (4) и (5), получим

$$t_{\text{н.к.}} = t_{\text{вх}} + \frac{P}{2c_p \rho v S_f}. \quad (7)$$

Подставляя (2), (3) и (7) в (1), получим:

$$P = 2\alpha A(B + C)(t_i - t_{\text{вх}}) - \frac{P}{2c_p \rho v S_f} + \alpha BC(t_s - t_{\text{н.к.}}). \quad (8)$$

Теплоотдачу α с боковой поверхности S РЭА воздуху внутри камеры определим по формуле, определяющей ее при ламинарном режиме движения жидкости внутри трубы. В этом случае α определяется факторами как вынужденного, так и свободного движения.

В [2] для определения коэффициента теплоотдачи в рассматриваемом нами случае рекомендуется следующая формула

$$Nu_f = 0,13 \sqrt[3]{Re_f Cr_f^{0,1} \varepsilon_R}, \quad (9)$$

где Nu_f , Re_f , Cr_f — критерии Нуссельта, Рейнольдса и Грасгофа.

Индекс «f» в перечисленных критериях показывает, что значения физических параметров воздуха берутся при средней температуры воздуха внутри камеры:

$$\varepsilon_R = 1,$$

где ε_R — поправочный коэффициент на ограниченность трубы.

Зависимость ε_R от отношения диаметра трубы d к длине l приводится в виде таблицы [2].

Таблица

l/d	1	2	5	10	15	20	30	50
ε_R	1,90	1,70	1,44	1,28	1,17	1,13	1,05	1,00

В логарифмических координатах зависимость $\varepsilon_0 = f\left(\frac{l}{d}\right)$ (рис. 1) хорошо описывается уравнением

$$\varepsilon_0 = K = 1,9 \left(\frac{l}{d}\right)^{-0,161}. \quad (10)$$

Здесь d — эквивалентный диаметр канала, который образуется при нахождении РЭА в камере

$$d = \frac{4f}{\Pi}, \quad (11)$$

где f — площадь поперечного сечения канала:

$$f = 2Bz + 2Cz + 4z^2; \quad (12)$$

Π — полный смачиваемый периметр поперечного сечения канала:

$$\Pi = 4(C + B) + 8z. \quad (13)$$

Тогда (11) с учетом (12) и (13) примет вид

$$d = \frac{4(2Bz + 2Cz + 4z^2)}{4(C + B) + 8z} = 2z. \quad (14)$$

Коэффициент теплоотдачи α определим, как в [2]

$$\alpha = \frac{Nu \cdot k}{d}. \quad (15)$$

Здесь и в дальнейшем в критериях подобия за определяющий размер будем принимать $d = 2z$.

$$Re_f = \frac{\rho \cdot v_f \cdot d}{\eta_f}, \quad Cr_f = \frac{g \Delta t_k z^3}{T \nu_f}, \quad (16)$$

где ν_f — коэффициент кинематической вязкости; g — ускорение силы тяжести.

Таким образом, подставляя в (15) выражение (9) с учетом (10), (14) и (16), получим

$$\alpha = 0,13 \left(\sqrt[3]{\frac{2v}{\nu_f}} \right) \left(\frac{2g \Delta t_k}{T \nu_f^2} \right)^{0,1} \cdot 1,9 \left(\frac{A}{2} \right)^{-0,161} z^{-0,4} \quad (17)$$

или

$$\alpha = \bar{\alpha} z^{-0,4}, \quad (18)$$

где

$$\bar{\alpha} = 0,013 (0,13 \cdot 10^6 \nu)^{0,333} (2,94 \cdot 18^3 \Delta t_k)^{0,1} \left(\frac{A}{2} \right)^{-0,161}. \quad (19)$$

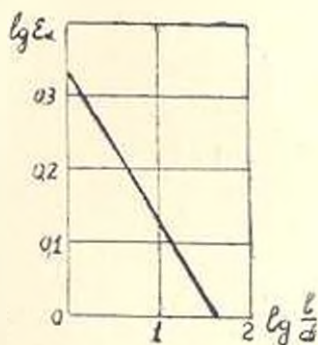


Рис. 1. Зависимость поправочного коэффициента ε_0

от $\frac{d}{l}$.

При определении α' с горизонтальной поверхности РЭА воспользуемся критериальным уравнением для теплоотдачи тел, омываемых поперечным потоком воздуха [2]

$$Nu_{l'} = 0,8 \sqrt{Re_{l'}}. \quad (20)$$

За определяющий размер в критериях примем длину обтекания горизонтальной поверхности $l' = \sqrt{BC}$:

$$Re_{l'} = \frac{v \sqrt{BC}}{\nu}. \quad (21)$$

Тогда коэффициент теплоотдачи α' определится следующим образом:

$$\alpha' = \frac{Nu \cdot \lambda}{\sqrt{BC}} \quad (22)$$

или

$$\alpha' = \frac{0,8 v^{0,5} \sqrt{BC} \cdot \lambda}{\nu^{0,5} \sqrt{BC}}. \quad (23)$$

Подставляя в (23) численные значения физических параметров воздуха, получим

$$\alpha' = 5,42 \sqrt{\frac{v}{BC}}. \quad (24)$$

Обозначим: $t_s - t_{\text{вх}} = \Delta t_s$. Тогда среднеповерхностный перегрев РЭА в камере относительно температуры воздуха на входе в камеру ($t_s - t_{\text{вх}}$) из уравнения (8) определится следующим образом:

$$\Delta t_s = \frac{P \left[1 + \frac{\alpha A (B + C)}{c_{\text{вх}} S_{\text{вх}}} \right]}{2\alpha A (B + C) + \alpha' BC}, \quad (25)$$

где α и α' рассчитываются согласно (18), (19) и (24).

Теперь запишем условие теплообмена РЭА в неограниченной среде, т. е.

$$P = \alpha_0 S \Delta t_s = \alpha'_0 S' \Delta t_s, \quad (26)$$

где $\Delta t_s = t_s - t_{\text{ср}}$ — среднеповерхностный перегрев корпуса РЭА относительно температуры окружающей среды.

Из (26) определим значение

$$\Delta t_s = \frac{P}{\alpha_0 S - \alpha'_0 S'} = \frac{P}{2\alpha_0 A (B + C) + \alpha'_0 BC}, \quad (27)$$

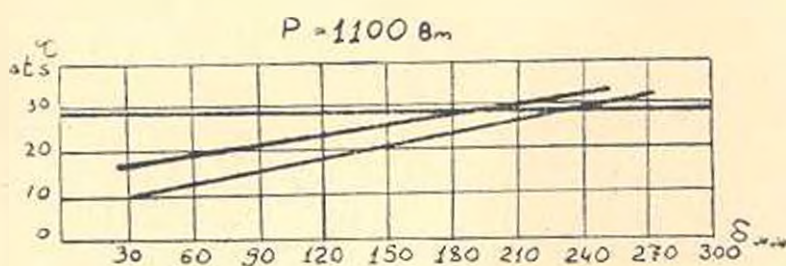
где α_0 и α'_0 — соответственно, коэффициенты теплоотдачи с боковой и верхней горизонтальной поверхностями корпуса РЭА в неограниченной среде.

Так как температурный напор $\Delta t_s > \left(\frac{840}{A}\right)^2$, то для определения коэффициента теплоотдачи с вертикально ориентированной поверхностью [2] справедлив закон $^{1/4}$, т. е.

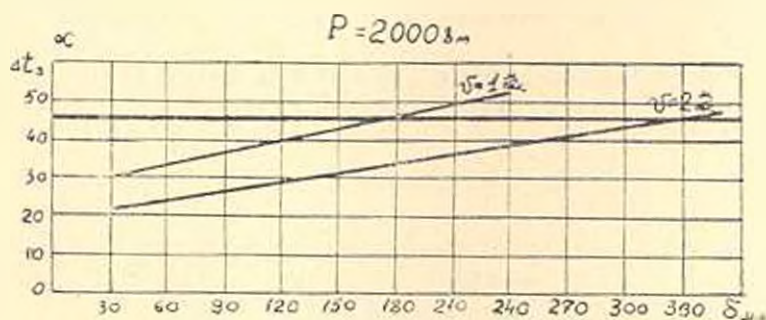
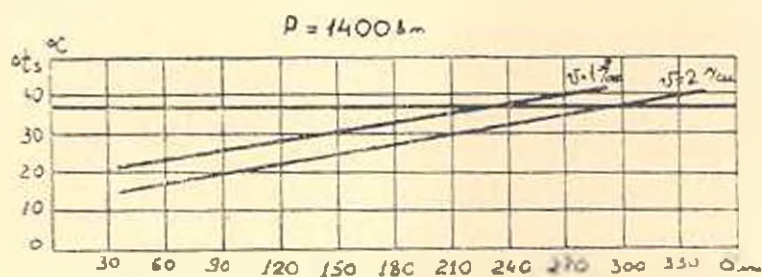
$$\alpha_0 = A_1 \Delta t_s^{1/4}, \quad (23)$$

где A_1 — коэффициент, характеризующий все физические параметры среды [2]:

$$A_1 = 0,135 (\beta g P_r)_m^{1/4} \frac{1}{m} [\text{см}/\text{м} \cdot \text{град}^{1/4}]. \quad (29)$$



а



в

Рис. 2. Зависимость среднесurfaceного перегрева корпуса РЭА относительно температуры окружающей среды от расстояния между поверхностями РЭА и внутренними стенками камеры при:

а) $P = 1100 \text{ Вт}$; б) $P = 1400 \text{ Вт}$; в) $P = 2000 \text{ Вт}$.

Коэффициент теплоотдачи с верхней горизонтальной поверхности корпуса РЭА рассчитывается как для горизонтально-ориентированной плоской поверхности, обращенной нагретой стороной вверх [2]

$$\alpha_0 = 1,3 A_2 \Delta t_s^{1/4}. \quad (30)$$

Подставляя в (27) значения α_0 и α_0' из (28) и (30), получим выражение для определения средисповерхностного перегрева корпуса РЭА Δt_s в неограниченной среде

$$\Delta t_s = \left\{ \frac{P}{A_2 [2A(B+C) + 1,3BC]} \right\}^{1/4}. \quad (31)$$

Условия теплообмена РЭА в камере адекватны условиям теплообмена в неограниченной среде, когда выполняется равенство (25) и (31), т. е.

$$\frac{P \left[1 + \frac{\alpha A (B+C)}{c_{\text{эф}} v S_f} \right]}{2\alpha A (B+C) + \alpha' BC} = \left\{ \frac{P}{A_2 [2A(B+C) + 1,3BC]} \right\}^{1/4}. \quad (32)$$

Аналитическое решение уравнения (32) относительно ξ представляется весьма громоздким, поэтому целесообразно решать его графически. С этой целью построим зависимость $M_1 = f(\xi)$, соответствующую выражению (25). Точка пересечения этой кривой с прямой, параллельной оси абсцисс (зависимость 31), определяет размер, который позволит выбрать испытательную камеру.

На рис. 2 приведены графические решения по определению величины ξ при испытании ЭВМ при мощности рассеивания $P = 1100, 1400, 2000$ Вт и скоростях воздуха внутри камеры $v = 1$ и 2 м/с.

ВЫВЕРИ

Поступило 22.IX.1978

Գ. Ս. ՄԵԼԻԿ-ԱԼԱՎԵՐԴՅԱՆ, Վ. Ս. ՏԵՐԶԱՆ, Լ. Ս. ՏԵՐ-ԿԱԶԱՐՈՎ

ՉԵՐՈՒԿԱՆՈՒՄԻՆՈՒԹՅԱՆ ՓՈՐՁԱՐԿԱՆ ԽՅՈՐԻ ՏԵՍԱԿԻ
ԵՎ ՉՍՓԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա Վ Փ Ր Ո Վ Ո Ւ Մ

Ուսումնասիրվում է ջերմակալունության փորձարկման խցի ընտրությանը, որում ջերմափոխանակման և շաղաղործման իրական պայմանները համընկնում են:

Դիտարկվում է ջերմափոխանակությունը փորձարկման խցում հարկադիր սղափոխության մամանակ (սղափոխիչը դրված է խցի վերևում), երբ փողաշեռանիստի ձև ունեցող ռադիոէլեկտրոնային սարքավորումը (ՌԷՄ) դրված է խցի հատակի կենտրոնում, իսկ ՌԷՄ-ի մակերևույթների ու խցի ներքին պատերի հեռավորությունները միանման են և հավասար չ:

Ստացված են հաճախորդները խցում ՌԷՍ-ի միջանկերեռլթային դեր-
տարացումները խցի մուտքում օդի ջերմաստիճանի նկատմամբ ($T_1 - T_{\text{ex}}$) որո-
շելու համար, ելնելով խցում և անսահմանափակ միջավայրում ՌԷՍ-ի ջեր-
մափոխանակության պայմաններից:

Ցույց է արված, որ աչգ հաճախորդների համատեղ լուծումը տալիս է
ճ-ի արժեքը, որը որոշում է ջերմակայունության փորձարկման խցի չափերը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Карачензя А. М., Хачикян Р. О., Терян В. А. Методика выбора типовых размеров испытательных камер. Тр. сем. «Методы и средства испытаний изделий на надежность», МЭИИИ, 1972, № 150—155.
2. Дубинин Г. Н., Семязкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. М., «Энергия», 1968.

ГИДРАВЛИКА

Р. М. МИРЗАХАНЫАН, Р. Е. АКОПЯН

О РАСХОДЕ ВОЗДУХА ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ
СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛОТНОМ СЛОЕ

При пневматическом транспортировании различных сыпучих материалов важное значение имеет концентрация движущейся аэросмеси, так как с ней связаны определяющие параметры процесса — необходимое давление и расход воздуха. Эта концентрация может характеризоваться величиной объемного расхода воздуха в условиях начала транспортной трубы, необходимого для перемещения единицы массы сыпучего материала — n_0 ($\text{см}^3/\text{кг}$)

$$n_0 = Q/G, \quad (1)$$

где Q — объемный расход воздуха в начале транспортной трубы, $\text{м}^3/\text{с}$,
 G — массовый расход транспортируемого материала, $\text{кг}/\text{с}$.

В настоящей работе предлагается метод расчета n_0 при транспортировании сыпучих материалов размерами частиц больше $0,1 \text{ мм}$ при помощи камерного питателя, изображенного на рис. 1 [1]. Предполагая, что в транспортную трубу поступает аэросмесь с постоянной пористостью ε , равной пористости наирыхлого неподвижного слоя данного материала, можно написать:

$$Q = w\varepsilon F; \quad (2)$$

$$G = \beta(1 - \varepsilon) F\rho_T, \quad (3)$$

В этих уравнениях w — скорость воздуха в порах между частицами, $\text{м}/\text{с}$; F — площадь сечения транспортной трубы, м^2 ; ρ_T — плотность твердых частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$; β — скорость твердых частиц в начале транспортной трубы, $\text{м}/\text{с}$.

Рис. 1. Пневмотранспортная установка.

Разность $(w - \beta)$ есть скорость воздуха относительно движущихся частиц, а относительная скорость n , рассчитанная на полное сечение трубы, определяется как

$$n = \varepsilon(w - \beta). \quad (4)$$

Из приведенных уравнений (1) — (4) получается следующее выражение для определения n_0 .

$$n_0 = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)\rho_r} = \frac{u}{3(1-\varepsilon)\rho_r}. \quad (5)$$

Для данной транспортной линии и сыпучего материала при заданной производительности значения λ , φ и ρ_r известны. Скорость u обуславливается перепадом давления воздуха ΔP ($Па$) в начальном участке транспортной трубы длиной Δl ($м$), определяемым уравнением

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_u, \quad (6)$$

где ΔP_0 — перепад давления, при котором начинается пневмотранспорт. $Па$; ΔP_u — потери давления на преодоление местного сопротивления при входе аэросмеси из емкости в транспортную трубу. $Па$; ΔP_0 равен весу частиц в слое длиной Δl , отнесенному к единице поперечного сечения трубы:

$$\Delta P_0 = \lambda g (1 - \varepsilon) \Delta l, \quad (7)$$

где g — ускорение силы тяжести, $м/с^2$. Потери давления ΔP_u выражаются через скоростной напор следующим уравнением

$$\Delta P_u = \xi \frac{1-\varepsilon}{\Phi} \rho_r u^2, \quad (8)$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления.

С другой стороны ΔP обуславливается относительным движением воздуха со скоростью u через поры движущихся частиц и определяется уравнением [2]

$$\Delta P = \lambda \frac{3(1-\varepsilon)}{2\varepsilon^3\Phi} \cdot \frac{\Delta l}{d} \cdot \frac{\rho a^2}{2}, \quad (9)$$

где ρ — плотность воздуха, $кг/м^3$; d — диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и бесформенная частица данного материала, $м$; Φ — фактор формы частиц; λ — коэффициент сопротивления, зависящий от гидродинамического режима движения воздуха через поры слоя, определяемого приведенным критерием Рейнольдса

$$Re = \frac{2a\varphi\Phi d}{3(1-\varepsilon)\eta}, \quad (10)$$

где η — вязкость воздуха, $Па \cdot с$. λ рассчитывается следующим уравнением [2]

$$\lambda = \frac{122,3}{Re} \cdot \frac{u_0}{u} + 2,34 \left(\frac{u_0}{u} \right)^{0,25}, \quad (11)$$

где u_0 — скорость начала псевдооживления твердых частиц, $м/с$.

На рис. 2 приведены опытные данные зависимости n_0 от φ при транспортировании различных сыпучих материалов по трубопроводам раз-

личных диаметров D и длин L . Значения ρ_0 и β вычислены уравнениями (1) и (3). Характеристики испытуемых материалов приведены в таблице.

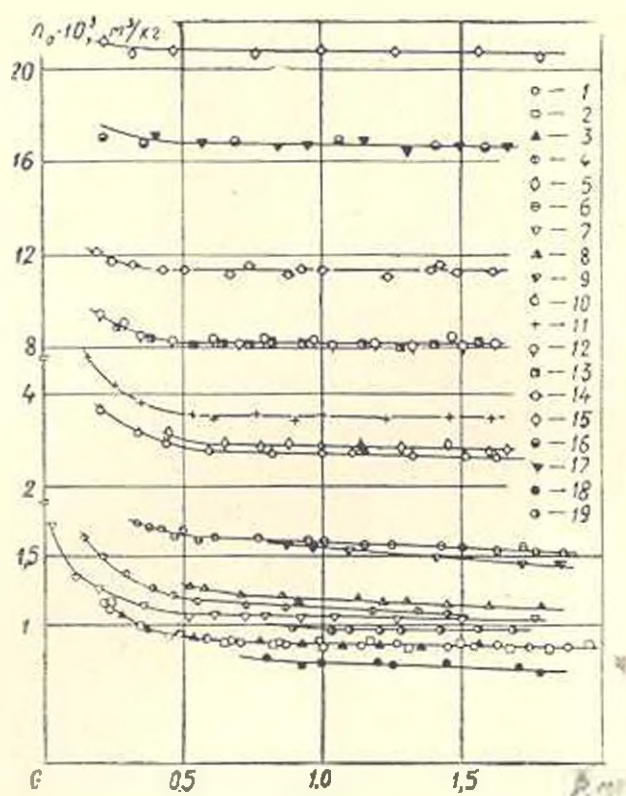


Рис. 2. Зависимость ρ_0 от скорости твердых частиц v . 1 — кварцевый песок, $D=52$ м.м., $L=10$ м; 2 — 25, 10; 3 — 78, 10; 4 — 15, 7; 5 — 8, 7; 6 — 12, 2; 7 — 19, 1,85; 8 — кремнеземный силик, $D=16$ м.м., $L=7$ м; 9 — 11, 7; 10 — карбамид, $D=78$ м.м., $L=10$ м; 11 — 52, 10; 12 — вермикулит, $D=37$ м.м., $L=1,25$ м; 13 — 52, 10; 14 — 20, 2; 15 — перлит, $D=37$ м.м., $L=1,25$ м; 16 — 52, 10; 17 — 68, 10; 18 — титано-магнелиевый концентрат, $D=16$ м.м., $L=7$ м; 19 — 11, 7.

Таблица

Характеристики транспортируемых материалов

№	М а т е р и а л	d , мм	ρ_T , кг/м ³	ε	Φ
1	Кварцевый песок	0,23	2640	0,47	0,828
2	Кремнеземный силик	0,17	2470	0,506	0,71
3	Карбамид	1,08	1335	0,435	0,875
4	Вермикулит	0,34	392	0,577	0,755
5	Перлит	0,45	142	0,55	0,787
6	Титано-магнелиевый концентрат	0,161	4510	0,5055	0,761

Для опытных точек рис. 2 уравнениями (6), (7), (8) и (9) вычислены величины ξ . При этом принимается $\Delta l = 1$ м и, следовательно, полученные значения ξ относятся к 1 м высоты слоя твердого материала. Для каждой серии опытов (при пневмотранспорте данного материала по данному трубопроводу) отклонения коэффициента ξ от его среднего значения не превышало 5%. На рис. 3 представлена зависимость средних для каждой серии опытов значений ξ от соотношения d/D . Получается, что $\xi = 28,12$ при $d/D < 0,01$ и $\xi = 281200 (d/D)^2$ — при $d/D > 0,01$.

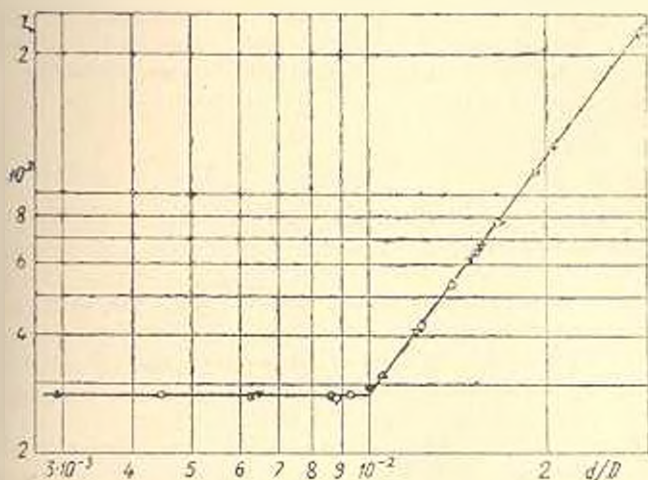


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного сопротивления от d/D (опытные точки соответствуют условиям рис. 2).

Расчет n_s проводят в следующем порядке. Для данного материала и трубопровода уравнениями (8), (7) и (6) определяются ΔP_m , ΔP_s и ΔP (принимается $\Delta l = 1$ м). Затем из уравнений (9), (10), (11) определяется u , а из (5) — n_s .

ПрПН им. К. Маркса

Поступило 21 II.1978

Ռ. Մ. ՄԻՐՉԱԽԱՆՅԱՆ, Ռ. Ե. ԱԿՈՅԱՆ

ՕՒՆԻ ՇԱԽԱՄԻՆԻ ՍՈՐՈՒՆ ԵՅՈՒԹՅՈՒՆ ԽԻՏ ՇԵՐՏՈՎ
ՊԵՆՎԻՐՏՐԱՆՍՊՈՐՏԻ ԺԱՄԱՆԱԿ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Առաջարկված է եղանակ՝ խիտ շերտով պինժոտրանսպորտի ժամանակ սորուն նյութերի միավոր քանակի տեղափոխման անհրաժեշտ ծախսը որոշելու համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гаспарян А. М., Акопян Р. Е. Авторское свидетельство. № 107815. 12.VII.1957.
2. Мирзаханян Р. М., Акопян Р. Е., Даниелян Н. Х. Пневмотранспорт сыпучих материалов в плотном слое. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXXI, № 1, 1978

ԿՆԵՐԵԼՈՇԻՆՈՒՄ ԱՌԻՆ

Ն. Վ. Ոլեյնիկ, Մ. Գ. Ստեկյան, Ա. Հ. Գրապարյան: Հիստորիկ դիմացկունության հաշվարկային զննահատուկ ցիկլային ռոտորով և ստատիկ ռոտորով բեռնավորելու դեպքում

3

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

Ա. Հ. Հովսեփյան, Լ. Ա. Խզմալյան: Բարդ ջրաատրանսպորտային համակարգի պարա-մետրերի օպտիմալացման խնդրի մաթեմատրկական մոզելը անալոգա-վային հաշվիչ համակիրի օգնությամբ

2

Ռ. Ա. Ավետիսյան, Ի. Ի. Նսրաբխանյան: Հենթամիջոցների մեջ մտնող էներգահա-մակարգերի հաստատված ուժերի հաշվման մի ալգորիթմի մասին

16

Ա. Ա. Հսրալյուրյան: Հիդրոարկան համակարգերի հաստատված ուժերի հաշվարկ-ներում հիդրոդային մատրիցայի կիրառման վերաբերյալ հտուպություններ

24

ՀԱՅՏՐԱՏՈՒՆԻԿԱ

Վ. Կ. Ալեխանյան: Ինդուկտորային զեննրատորի՝ որպես զեկամարման էլեկտրի կա-յունության արդման մեթոդը

33

ՉԱՓՈՂԱՌԱՆ ՏՆԵՆԻԿԱ

Ա. Ն. Դսուպարյան, Է. Գ. Լիլյանյան: Բարձրագույն հետեղ համակարգերի դինամիկ հզորություն մասին

38

ՀԱՇՎՈՂԱՌԱՆ ՏՆԵՆԻԿԱ

Գ. Ս. Օրդույան, Լ. Հ. Ռամնարյան: Մուրալ և Սիսցյալ համակարգի էլեկտրոնային հաշ-վիչ մեքենաների համառնողումն ըստ մոտորի

47

ՋԵՐՄԱՏՆԵՆԻԿԱ

Գ. Ս. Մելիք-Ալալբերդյան, Վ. Ա. Տերյան, Լ. Ս. Տեր-Ասադուրով: Ջերմակայունության փոր-ձարկման խցերի տեղանկի և չափերի բնորոշությունը

55

ՀԻԿՈՒՆԷԼԻԿԱ

Ռ. Մ. Միրզախանյան, Ս. Ս. Հակոբյան: Ղդի ծախսը սարուն կյաթերի խիտ շերտով պնեմոդրանսպորտի ժամանակ

62

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Н. В. Олейник, М. Г. Сталян, С. А. Гаспарян.* Расчетная оценка выносливости лалов при нагружении циклическим изгибом и статическим кручением 3

ЭНЕРГЕТИКА

- С. Г. Акопян, Л. А. Хамаян.* Математическая модель задачи оптимизации параметров сложных газотранспортных систем на аналого-цифровом вычислительном комплексе 9
- Р. А. Амирикян, Н. И. Шарайхиян.* Об одном алгоритме расчета установившегося режима энергосистем, входящих в энергообъединение 16
- А. А. Арутюнян.* Исследования, связанные с использованием гибридной матрицы в расчетах установившихся режимов электрических систем 24

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- В. Г. Александрян.* Метод определения устойчивости индукторного генератора как объекта управления 33

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- О. Н. Гаспарян, Г. Г. Есикарян.* О логарифмической точности многосвязных следящих систем 38

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Г. С. Ордуян, Л. О. Жамгарян.* Совместимость вычислительных машин серии «Урал» и ЕС ЭВМ по вводу 47

ТЕПЛОТЕХНИКА

- Г. С. Мелик-Алавердян, В. А. Терян, Л. Б. Тер-Казаров.* Выбор типоразмеров испытательных камер на теплоустойчивость 55

ГИДРАВЛИКА

- Р. М. Мирзахиян, Р. Е. Акопян.* О расходе воздуха при пневмотранспорте сыпучих материалов в плотном слое 62

