

Журнал издается с 5. 01. 1948 г.

Выходит 6 раз в год

Խ Ր Ե Յ Դ Ն Կ Ո Ւ Ե Յ Ի Վ

Ռ. Ծ. Մարգարյան (պատասխանատու խմբագիր), Վ. Վ. Ալեքսևսկի,
Ռ. Վ. Արսյան, Ռ. Ս. Ղազարյան, Ս. Մ. Ղազարյան, Մ. Վ. Կասյան,
Վ. Զ. Սահակյան, Յու. Լ. Սարգսյան, Մ. Գ. Ստեփանյան (պատ. խմբ. տեղ.),
Ջ. Կ. Սեֆեյանյան (պատասխանատու փարատագիր), Վ. Ս. Խաչատրյան:

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р. М. Мартиросян (ответственный редактор), В. В. Алексеевский,
Р. В. Атоян, Р. А. Казарян, С. М. Казарян, М. В. Касьян,
А. О. Саакян, К. Л. Саркисян, М. Г. Стакин (зам. ответ редактора),
З. К. Степанян (ответственный секретарь), В. С. Хачатрян

УДК 621.01

К. Г. СТЕПАНЯН, Г. С. АПРАХЕТЯН, К. С. АРЗУМАНЯН

ДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕХАНИЗМОВ ПО
МАКСИМАЛЬНОМУ ЗНАЧЕНИЮ РАДИУСА УСКОРЕНИЯ

Приведен упрощенный алгоритм определения радиуса ускорения механизмов и разработан метод их динамического синтеза по максимальному радиусу ускорения. Показано, что в математической постановке задача динамического синтеза сводится к минимаксным задачам с ограничениями, для решения которых эффективным является метод случайного поиска при определении максимумов негладких функций. Предложенный метод иллюстрирован численным примером.

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 2 назв.

Դինամիկ ի մեխանիզմների արագացման շառավղի որոշման պարզեցված ալգորիթմ և զարգացված է նրանց դինամիկական համադրման մեթոդ՝ բառ արագացման շառավղի մեծագույն արժեքի, Յուլյո է տրված, որ մաթեմատիկական դրվածքով դինամիկական համադրման խնդիրը բերվում է սահմանափակումներով մինիմաքսի խնդրի, որի լուծման համար առավել արդյունավետ է ոչ ողորկ ֆունկցիաների մեծագույն արժեքների որոշման պատահական փրենտերման մեթոդը: Առաջարկված մեթոդը ծրագրված է ԲԺՀ-ին օրինակով:

Дифференциальные уравнения движения механизма представляются в виде

$$\sum_{j=1}^w a_{lj}(q, \dot{q}) \ddot{q}_j = \sum_{j=1}^w b_{lj}(q, \dot{q}) P_j + c_l(q, \dot{q}), \quad l = 1, 2, \dots, w, \quad (1)$$

где $q = (q_1, q_2, \dots, q_w)$ и $\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_w)$ — соответственно векторы обобщенных координат и скоростей; $\ddot{q}_j$ ($j = 1, 2, \dots, w$) — обобщенные ускорения; $l = (l_1, l_2, \dots, l_n)$ — вектор инерционных параметров механизма; a_{lj}, b_{lj}, c_l ($l, j = 1, 2, \dots, w$) — известные функции скоростей и инерционных параметров от обобщенных координат, вид которых зависит от структуры механизма; w — число степеней подвижности; P_j — движущие силы, значения которых меняются в пределах

$$P_{jmin} \leq P_j \leq P_{jmax} \quad (2)$$

При заданных инерционных параметрах $l_1, l_2, \dots, l_n$ и ряда наборов $q_n, \dot{q}_n$ ($n = 1, 2, \dots, w$, $l = 1, 2, \dots, N$) обобщенных координат и скоростей уравнения (1) позволяют определить те обобщенные ускорения $\ddot{q}_n$, которые могут развиваться механизмом из соответствующих конфигураций $q_n = (q_{n1}, q_{n2}, \dots, q_{nw})$. Для этого выбираем некоторый набор движущих сил P_n , удовлетворяющих условиям (2), и N раз решаем линейную систему (1). Очевидно, най-

денное в каждой i -ой конфигурации механизма ускорение $\bar{q}_i = (\bar{q}_{i1}, \bar{q}_{i2}, \dots, \bar{q}_{in})$ зависит от выбранных значений движущих сил P_j . Точки $\bar{q}_i = (\bar{q}_{i1}, \bar{q}_{i2}, \dots, \bar{q}_{in})$, соответствующие всевозможным наборам этих сил, удовлетворяющих условиям (2), образуют в пространстве обобщенных ускорений некоторое непрерывное множество, которое обозначим через $K_i(I)$. Объединение всех множеств $K_i(I)$, соответствующих выбранным конфигурациям механизма, определяет в вышеуказанном пространстве множество $K(I) = \bigcup_{i=1}^N K_i(I)$, грань которого обозначим через $G(I)$. Минимальное расстояние $R(I)$ точек грани $G(I)$ от начала координатной системы обобщенных ускорений в работе [1] названо радиусом ускорения.

Представим упрощенный метод определения радиуса ускорения. Из линейности уравнений (1) движения механизмов относительно обобщенных ускорений и движущих сил, а также из условий (2) следует, что грань $G_i(I)$ множества $K_i(I)$ в ω -мерном пространстве обобщенных ускорений представляет собой выпуклый 2ω -гранник, координатами вершин которого являются те наборы обобщенного ускорения $\bar{q}_i = (\bar{q}_{i1}, \bar{q}_{i2}, \dots, \bar{q}_{in})$, которые соответствуют граничным значениям $P_{j\min}$ и $P_{j\max}$ движущих сил. Поэтому чтобы найти уравнения гиперплоскостей, характеризующих грани 2ω -гранника, необходимо сначала для всевозможных наборов $(P_1, P_2, \dots, P_\pi)$ движущих сил, составленных из их граничных значений $P_{j\min}$ и $P_{j\max}$, решением линейной системы (1) определить 2^ω наборов обобщенных ускорений $\bar{q}_i = (\bar{q}_{i1}, \bar{q}_{i2}, \dots, \bar{q}_{in})$ ($v = 1, 2, \dots, 2^\omega$) и соответствующие им точки в пространстве обобщенных ускорений. Затем составляем всевозможные наборы $\bar{q}_{i1}, \bar{q}_{i2}, \dots, \bar{q}_{in}$ ω точек и через них проводим гиперплоскость, уравнения которых имеют вид

$$\begin{vmatrix} q_1 - q_{11} & q_2 - q_{21} & \dots & q_n - q_{n1} \\ q_{12} - q_{11} & q_{22} - q_{21} & \dots & q_{n2} - q_{n1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{1\omega} - q_{11} & q_{2\omega} - q_{21} & \dots & q_{n\omega} - q_{n1} \end{vmatrix} = 0, \quad (3)$$

$$v_1, v_2, \dots, v_\omega \in \{1, 2^\omega\}.$$

Нетрудно заметить, что гиперплоскость (3) принадлежит грани $G_i(I)$, если точки $\bar{q}_{iv}$, координаты которых не входят в ее уравнение, находятся в одном полупространстве. Для этих точек значения определителя в левой части равенства (3) должны иметь одинаковые знаки. По этому признаку выделяем все 2ω грани множества $K_i(I)$, которые обозначим через $\Pi_{1i}, \Pi_{2i}, \dots, \Pi_{2\omega i}$. Если начало координат-

ной системы обобщенных ускорений принадлежит множеству $K_i(I)$, то радиус ускорения $R_i(I)$ механизма для его i -ой конфигурации определяется как минимальное значение наикратчайших расстояний начала системы обобщенных ускорений от гиперплоскостей Π_i . Если же начало вышеуказанной системы не принадлежит множеству $K_i(I)$, то задача об определении $R_i(I)$ сводится к нахождению наикратчайшего расстояния точки $q = (0, 0, \dots, 0)$ от выпуклой оболочки $G_i(I)$.

На рис. 1 и 2 иллюстрированы примерные виды множества $K_i(I)$ и его границ $G_i(I)$ для механизмов с двумя степенями свободы.

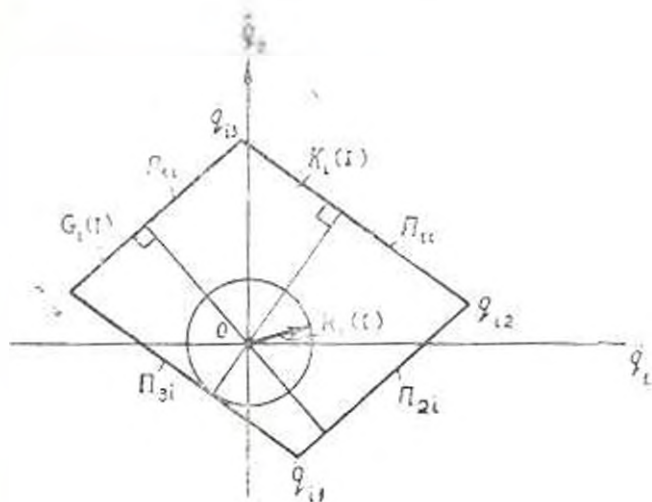


Рис. 1.

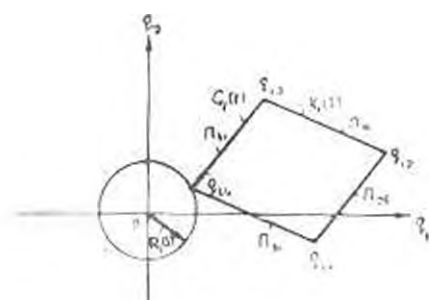


Рис. 2.

Осуществляя предложенную процедуру для всех заданных конфигураций q_i механизма, определим N значений $R_i(I)$, минимальное $R(I) = \min_{i \in \{1, \dots, N\}} R_i(I)$ из которых будет его радиус ускорения.

Радиус ускорения является одной из динамических характеристик механизма, оценивающих качество его работы. С ним связано и такое важное свойство механизма, каким является быстродействие.

В частности, чем больше радиус ускорения, тем меньше время, за которое можно перевести механизм из начального состояния в конечное, что, в свою очередь, увеличивает его производительность. В связи с этим ставится задача динамического синтеза механизмов по максимальному радиусу ускорения. Требуется определить такие итерационные параметры $I^* = (I_1^*, I_2^*, \dots, I_n^*)$, для которых

$$R(I^*) = \max_{I \in [I]} R(I), \quad (4)$$

где множество $[I]$ задается неравенствами

$$I_{r \min} \leq I_r \leq I_{r \max}, \quad r = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

По своей сущности поставленная задача (4) является максиминной задачей с ограничениями (5), которая может быть решена методами, изложенными в [2]. Однако в данном случае достаточно эффективным является метод случайного поиска, смысл которого заключается в следующем. Предположим, что k -ое приближение $I^{(k)} = (I_1^{(k)}, I_2^{(k)}, \dots, I_n^{(k)})$ уже известно. Опишем построение $I^{(k+1)}$. С помощью датчика случайного вектора $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ с заданным законом распределения получаем его N_1 реализации $\xi_p = (\xi_{p1}, \xi_{p2}, \dots, \xi_{pn})$ ($p = 1, 2, \dots, N_1$) и в пространстве E^n искомым инерционных параметров $I_1, I_2, \dots, I_n$ определяем точки с координатами

$$I_{rp} = I^{(k)} + \alpha_p \xi_{rp}, \quad (6)$$

где α_p — заданные положительные числа.

Для всех векторов $I_p = (I_{p1}, I_{p2}, \dots, I_{pn})$ по предложенному выше алгоритму определяем $R(I_p)$ и среди них выбираем тот $p_0 \in \{1 : N_1\}$, для которого

$$R(I_{p_0}) = \max R(I_p), \quad I_{r \min} \leq I_{rp_0} \leq I_{r \max}.$$

Если такой p_0 существует, то полагаем $I^{(k+1)} = (I_{p_01}, I_{p_02}, \dots, I_{p_0n})$, где I_{p_0r} определяются по формуле (6). Если же указанного p_0 не существует, то процесс прекращаем и можем принять $I^* = I^{(k)}$.

В качестве примера рассмотрим синтез плоского манипулятора платформенного типа (рис. 3) со следующими геометрическими параметрами: $X_{A1} = 0$, $Y_{A1} = 0$, $X_{A2} = 0,4$, $Y_{A2} = 0$, $X_{A3} = 0,4$, $Y_{A3} = 0,35$, $x_{c1} = 0,1$, $y_{c1} = -0,015$, $x_{c2} = 0,1$, $y_{c2} = -0,45$, $x_{c3} = 0$, $y_{c3} = 0$, $I_1 = I_2 = I_3 = 0,075$. В таблице приведен набор десяти заданных конфигураций и скоростей манипулятора.

При принятых обозначениях здесь требуется определить следующие инерционные параметры: $I_1 = m_1$, $I_2 = I_{s1}$, $I_3 = I_{s1}$, $I_4 = I_{s2}$, $I_5 = I_{s2}$, $I_6 = m_2$, $I_7 = I_{s3}$, $I_8 = m_3$, $I_9 = I_{s3}$, $I_{10} = m_7$, $I_{11} = I_{s7}$, где $m_1, m_2, m_3, m_7, I_{s1}, I_{s2}, I_{s3}, I_{s7}$ — соответственно массы и центральные

моменты инерции звеньев 1, 3, 5 и 7, а I_{A_1} , I_{A_2} , I_{A_3} — моменты инерции звеньев 2, 4, 6 относительно точек A_1 , A_2 и A_3 .

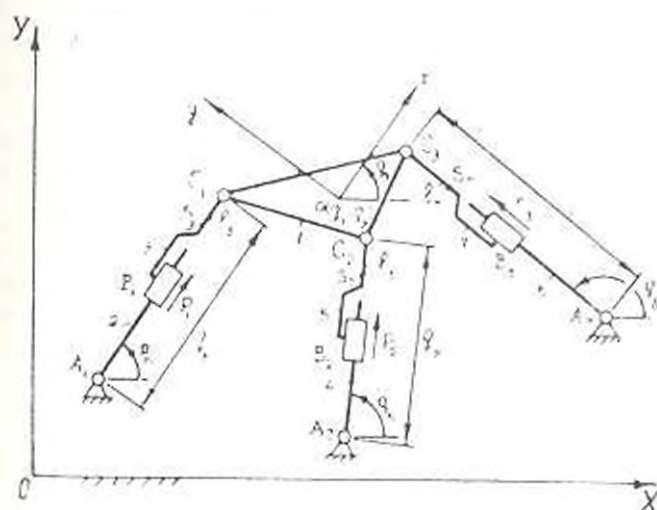


Рис. 3

Таблица

Параметры	Конфигурации манипулятора									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
q_1	0,200	0,220	0,180	0,191	0,180	0,190	0,210	0,220	0,210	0,180
q_2	0,215	0,195	0,235	0,215	0,225	0,235	0,225	0,235	0,205	0,195
q_3	0,000	0,200	0,200	-0,190	0,100	0,000	-0,200	0,100	0,200	0,100

Примечание $q_1 - q_2 - q_3 = 0$.

В процессе синтеза получены следующие значения выходных параметров: $I_1^* = 1$, $I_2^* = 0,003$, $I_3^* = I_4^* = I_5^* = 0,00925$, $I_6^* = I_7^* = I_{10}^* = 0,3$, $I_7^* = I_8^* = I_{11}^* = 0,00155$, $R(I^*) = 26,0795$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Graettinger Timothy L., Kough Bruce H. The Acceleration Radius: A Global Performance Measure for Robotic Manipulators, IEEE, Journal of Robotics and Automation. — 1988 — Vol. 4 — № 1. — P. 60—69.
2. Дельяно В. Ф., Малоземин В. Н. Введение в минимакс. — М.: Наука, 1972 — 368 с.

УДК 621.775.8

Р. И. ДЖАВАХЯН, Н. Г. ДАНИЕЛЯН, Ю. А. АКОПЯН,
Г. Д. СТЫРКИН, Т. Д. КАРАШЕТАНБРИКЕТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУЖКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

Предложено в качестве связующих веществ при брикетировании металлической стружки использовать порошкообразные полимерные материалы, в частности, полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и др. Показано, что при содержании полимерного связующего в количестве 6—8 вес. % и предварительном подогреве шихты до температуры размягчения полимера (90—100°C) удается на порядок уменьшить давление прессования и получить при этом качественные и прочные брикеты. Исследованы механические свойства полученных брикетов и предложена технологическая схема брикетирования металлической стружки с использованием полимерных связующих.

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 3 назв.

Առաջարկվում է մետաղական աղյուսի կադավարման ժամանակ որպես կապակցող նյութ օգտագործել պոլիմերային նյութեր՝ մանածիկապուն քլորիդներ, պոլիպրոպիլեն և պոլիէթիլեն և փոխապահովող քանակին 6—8 % թույլ գերընթաց նախապես տաքացվում է թինքն պոլիմերի փափկացման ջերմաստիճանը (90—100°C), հաջորդում է մամլման ճնշումը մեկ կարգով իջեցնել և ստանալ որակյալ ու ամուր քրիկներ: Ուսումնասիրված են ստացված բրիկետների մեխանիկական հատկությունները և առաջարկված է պոլիմերային կապակցող նյութերի պատշաճորձամբ մետաղական աղյուսի կադավարման տեխնոլոգիական սխեմա:

Брикетирование металлической стружки осуществляется холодным и горячим способами, которые отличаются друг от друга методами предварительной подготовки стружки [1, 2]. Для получения плотных металлических брикетов холодным способом необходимо создать в пресс-камере прессы давление не менее 300—400 МПа, а для этого потребуются мощные крупногабаритные прессы с усилием порядка 5000 кН. Использование же горячего брикетирования, при котором стружка предварительно нагревается до 850—900°C, хоть и снижает давление прессования, но требует довольно сложного технологического процесса. Весьма актуальной является задача создания малогабаритных передвижных устройств брикетирования [2], которые позволили бы осуществлять брикетирование стружки в цеху, непосредственно у металлообрабатывающих станков, а получать достаточно прочные брикеты при сравнительно низких давлениях прессования. С целью эффективного снижения давления прессования и уменьшения энергозатрат предлагается способ теплого брикетирования металлической стружки с использованием полимерных связующих.

В качестве связующих веществ для брикетирования металлической стружки были испробованы полимерные материалы, в частности, полиэтилен низкой и высокой плотности, полипропилен и поли-

винилхлорид. Выбор этих веществ обусловлен несколькими факторами. Во-первых, в условиях высокого давления и деформации сдвига возможно склеивание металлических изделий с помощью полимерных материалов. Во-вторых, полимеры можно получать в порошкообразном виде, и это значительно упрощает процесс смешивания брикетируемой стружки со связующим. Немаловажное значение имеет и наличие достаточно большого количества отходов полимерной промышленности, что делает это сырье доступным и дешевым. Кроме этого, полимеры при высоких температурах полностью стирают и металл при переплавке брикетов не загрязняется посторонними примесями.

Опыты проводились с металлической стружкой (чугунной, латунной и стальной) без добавок и с добавками связующих веществ. Металлическая стружка в экспериментах использовалась без предварительного измельчения, грохочения, очистки и сушки. Производство стружки производилось на гидравлическом прессе со съёмными формами в холодном состоянии и с предварительным нагревом стружки. Давление прессования менялось от 5 до 70 МПа. Брикетирование осуществлялось в следующем порядке: Сначала загружали в смеситель компоненты приготавливаемой смеси: стружку 92—94 вес. % и порошкообразный полиэтилен 6—8 вес. %. После смешивания (или одновременно со смешиванием) смесь нагревали до 90—100 °C (т. е. до температуры размягчения полимера, при которой проявляются его клеящие свойства) и прессовали в цилиндрические брикеты диаметром 120 мм и высотой 30—100 мм (рис. 1). Качество получаемых брикетов определялось через 24 ч после их изготовления испытанием на механическую прочность, в частности, на сопротивление удару, истиранию, изгибу и сжатию по методике, используемой в углебрикетной промышленности [3].

Испытание на временное сопротивление удару производилось сбрасыванием брикета с высоты 1 м на чугунную плиту и установлением числа ударов N до разрушения брикета. Испытание на истирание производилось во вращающемся металлическом барабане, к внутренней поверхности которого на равных расстояниях приварены под углом 90° три продольные полосы из угловой стали и виде ребер высотой 100 мм. В барабан загружали готовые брикеты с известным весом и приводили его в движение со скоростью 25—33 об/мин. После 100 оборотов барабан останавливали и извлекали брикеты. Значения коэффициента связности были определены по формуле $k = m/m_0$, где m_0 и m — масса брикета до и после истирания. Испытание на сопротивление изгибу производили на специальном устройстве, состоящем из трех трехгранных призм, из которых две нижние служат для поддержания брикета и укреплены на горизонтально установленной каретке на расстоянии, равном 0,7 диаметра брикета. Третья призма с помощью приспособления крепится к верхней плите пресса, причем она должна располагаться посередине — между ниж-

ними призмами. По значению давления в момент разрушения брикета определялся предел его прочности на изгиб $\sigma_{изг}$. Испытание брикетов на сопротивление сжатию производили на гидропрессе. Испытуемый образец подвергался сжатию при помощи раздавливающей головки штенделя, имеющей основание, равное половине основания брикета, и по среднему значению давления в момент разрушения брикета определялось временное сопротивление сжатию $\sigma_{сж}$.

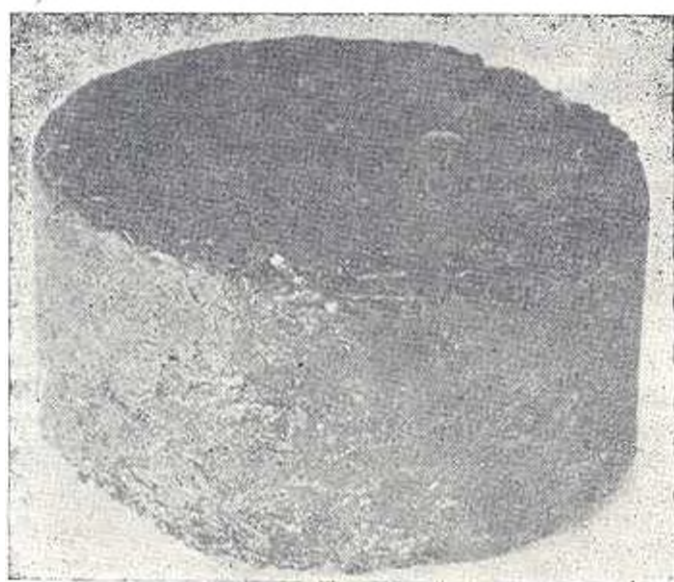


Рис. 1. Чугунный брикет, полученный с добавлением 8 вес. % порошка полиэтилена и нагрева шихты до 900°С.

Коэффициент усадки металлической стружки k_u в процессе прессования определялся следующим образом: замерялась высота засыпки стружки в форме перед прессованием, затем в форму устанавливался шток, после чего она помещалась под плунжер пресса. Прессование стружки производилось до достижения давления 70 МПа. Во время прессования делались замеры высоты внешней части штока через интервалы в 10 МПа. Графики изменения коэффициента усадки, представляющего отношение начальной высоты засыпки стружки к высоте брикета, показывают (рис. 2), что наиболее интенсивно усадка протекает лишь в начальный период прессования. По мере возрастания давления прессования p соответственно увеличивается сопротивление материала сжатию, в результате чего усадка происходит все медленнее до тех пор, пока плотность брикета не окажется близкой к плотности материала стружки, и усадка не прекратится. В частности, для брикетирования металлической стружки можно ограничиться давлением 40 МПа, выше которого имеет место лишь незначительное увеличение коэффициента усадки и нерациональный расход энергии.

На рис. 3 показана зависимость прочности металлических брикетов от содержания в них полимерных связующих G . Как видно, прочность брикетов слабо зависит от природы металла. Повышение содержания полимера в брикете увеличивает его прочность, однако это связано с дополнительными расходами полимера. Оптимальным следует считать содержание полимерного связующего в брикете, равного 6—8 вес. %.

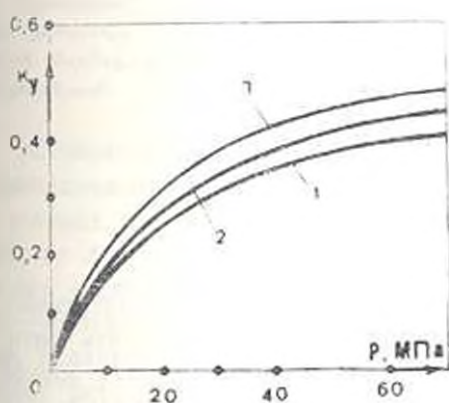


Рис. 2. Зависимость усадки металлической стружки от величины давления прессования. Стружки: 1 — чугуная, 2 — стальная, 3 — латуновая.

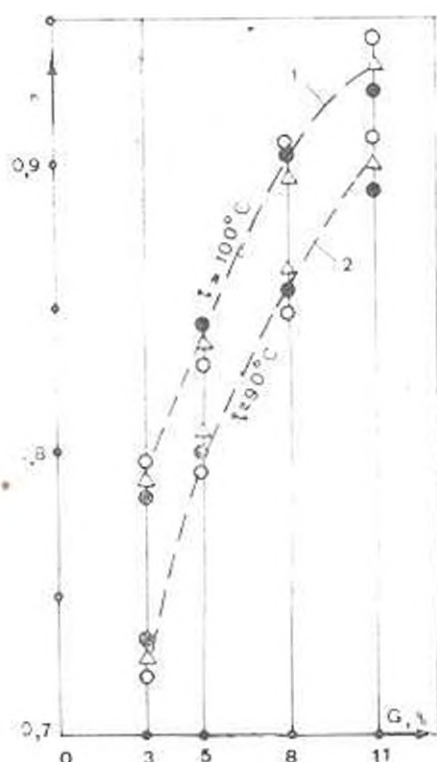


Рис. 3. Зависимость прочности брикета от содержания связующего при давлении прессования $p = 20$ МПа: 1 — связующее — полиэтилен, 2 — связующее — полипропилен, брикеты: — стальной, — чугунный, ● — латунный.

Качество брикетов зависит и от времени протекания процесса. При медленном ходе пуансона, исчисляемом секундами, зерна в шихте успевают оптимально переориентироваться за счет возможности их перемещения в период сжатия, и брикеты получаются более плотными и прочными, чем при больших скоростях прессования. После прессования металлические брикеты не нуждаются в дополнительном охлаждении, т. к. они практически не слипаются даже в нагретом состоянии.

Значения параметров, характеризующих механические свойства брикетов, представлены в таблице. Их сравнение показывает, что природа металла слабо влияет на процесс его взаимодействия со связующим. Основное влияние оказывает давление прессования. Применение полимеров и качестве связующей добавки позволяет при довольно низких давлениях прессования (10..40 МПа) вместо

300...450 МПа при брикетировании без связующих) получать весьма прочные брикеты, которые без разрушения могут транспортироваться.

Таблица

Значения параметров характеризующих процесс
брикетирования и механические свойства
полученных брикетов

Стружка	$Q_0 \cdot 10^3$	P_0 МПа	$T_{\text{сж}}$ МПа	$T_{\text{ср}}$ МПа	N	K
Чугунная	8	10	6,25	0,22	2	0,75
		20	7,00	0,44	3	0,79
		30	8,13	1,16	4	0,82
		40	8,83	1,21	6	0,88
Стальная	8	10	5,91	0,36	1	0,71
		20	6,6	0,91	3	0,73
		30	7,51	1,08	4	0,79
		40	8,00	1,15	5	0,86
Латунная	6	10	3,86	0,50	2	0,71
		20	4,46	0,67	2	0,73
		30	5,13	0,85	4	0,79
		40	5,91	0,98	5	0,82

Предлагаемый способ брикетирования, помимо значительного снижения давления прессования, позволяет заметно повысить антикоррозийную стойкость брикетов, поскольку они окружены тонкой полимерной пленкой, защищающей от коррозии. Он позволяет при сравнительно малых давлениях получать качественные брикеты с хорошими механическими свойствами и создает предпосылки для использования маломощных самоходных брикетировочных устройств, осуществляющих уборку стружки, ее брикетирование в цеху и транспортировку готовых брикетов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Вино С. К. Утилизация металлических отходов в развитых капиталистических странах — Минск: БелНИИИИ, 1978. — 52 с.
2. Алексеев А. В. Сбор и переработка металлической стружки. — М.: Машиностроение, 1980. — 120 с.
3. Турье Г. А. Неиспользуемые угли и технология их брикетирования. — М.: Профтехиздательство, 1961 — 283 с.

ЕрПН

20 X. 1989

УДК 69.057.122.001.5

Р. С. МИНАСЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕПЛАНАЦИОННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В УГЛАХ ОКОННОГО ПРОЕМА СТЕНОВОЙ ПАНЕЛИ МЕТОДОМ
МОМЕНТНОЙ ДЕПЛАНАЦИИ СЕЧЕНИЙ

Рассматривается решение задачи по определению местных напряжений в углах проемов стен крупнопанельных зданий. Использован метод моментной депланации теории упругости. Изучены также поведения напряжений в углах проемов.

Ил. 1. Библиогр.: 2 назв.

Երկրորդական է բացարձակորեն չհանդիպող լինելը պրակտիկական և տեսական հարցերի միմյանցից: Օգտագործվել է մոմենտային դեփլանացիայի տեսության մոմենտային դեփլանացիայի մեթոդը: Ուսումնասիրվել են նաև պրակտիկական դարձը հարցերը:

Сравнение результатов многочисленных теоретических и экспериментальных исследований в области расчета местных напряжений в угловых точках проема показали, что они достаточно отличаются друг от друга. Основная причина заключается в том, что в теоретических исследованиях не учтено главное, и очень характерное явление—моментная депланация сечений в зонах концентрации напряжений, отличающаяся высоким градиентом. Траектория главных напряжений резко изгибаются перед этими сечениями, в результате чего на главных осях возникает моментное взаимодействие напряжений и моментный депланационный сдвиг.

В качестве расчетной модели рассматривается фрагмент, состоящий из четверти панелей, нагруженных только вертикальной нагрузкой (рис.). Для определения напряжений с учетом вышеуказанного предлагается метод, основанный на начале возможных перемещений уравнений, выражающих условия равновесия элементарного параллелепипеда, выделенного из исследуемой модели.

Если обозначим продольные перемещения по оси z — $v(x, z)$, поперечные по оси x — $u(x, z)$ и запишем на основании начала возможных перемещений уравнения, выражающие условия равновесия элементарного параллелепипеда в направлении осей x и z , то получим уравнения, выражающие работу внешних и внутренних сил на соответствующих перемещениях [1]

$$\int_V \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} v(x, z) dV - \int_{\partial V} \frac{\partial \sigma_z(x, z)}{\partial x} u dF = 0, \quad (1)$$

$$\int_V \frac{\partial \sigma_{xz}^p}{\partial z} u(x, z) dF - \int_V \tau_{xz} \frac{\partial u(x, z)}{\partial x} dF = 0, \quad (2)$$

где $\sigma_{xz}^p, \tau_{xz}^p$ — компоненты уравновешивающих напряжений.

Выражение перемещения удобно представить в виде

$$u(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(z) \sin \alpha_n x, \quad v(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n(z) \cos \alpha_n x, \quad (3)$$

$$(\alpha_n = \pi n / l).$$

где $u_n(z)$ и $v_n(z)$ — искомые функции, зависящие только от z .

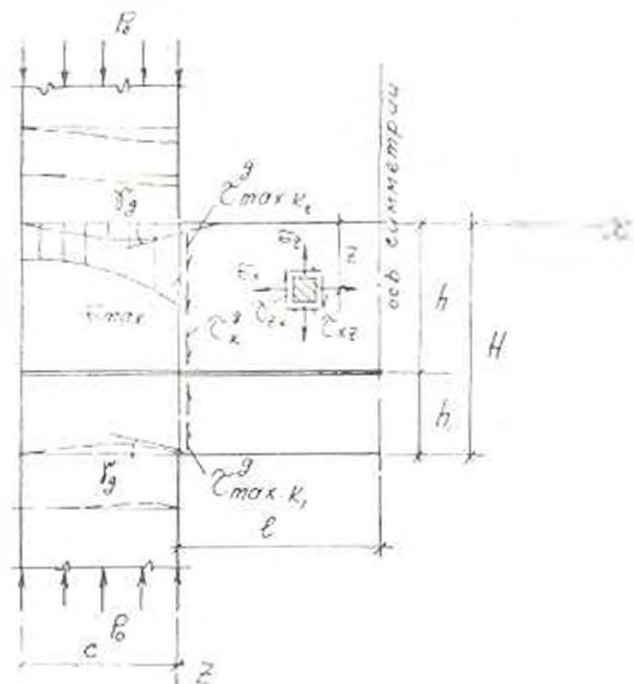


Рис.

С учетом (3) выражения (1) и (2) можно написать в виде

$$\int_V \frac{\partial \sigma_{xz}^p}{\partial z} v_n(z) \cos \alpha_n x dF - \int_V \tau_{xz}^p \alpha_n v_n(z) \sin \alpha_n x dF = 0, \quad (4)$$

$$\int_V \frac{\partial \tau_{xz}^p}{\partial z} u_n(z) \sin \alpha_n x dF + \int_V \tau_{xz}^p \alpha_n u_n(z) \cos \alpha_n x dF = 0. \quad (5)$$

Согласно обобщенному закону Гука:

$$\sigma_{xz}^p = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{\partial v(x, z)}{\partial z} + \nu \frac{\partial u(x, z)}{\partial x} \right] + \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\tau_{xz}^p = \frac{E}{1+\nu} \left[\frac{\partial u(x, z)}{\partial x} + \nu \frac{\partial v(x, z)}{\partial z} \right].$$

$$\tau_{xz}^p = \frac{E}{2(1+\nu)} \left[\frac{\partial v^p(x, z)}{\partial x} + \nu \frac{\partial u(x, z)}{\partial z} \right], \quad (7)$$

$$\tau_{xz}^s = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\partial v(x, z)}{\partial x}.$$

Для упрощения задачи принимается, что депланационный сдвиг возникает только по оси z и в уравнениях (6), (7) приближенно принимается: $\tau_{xz}^p = \partial v(x, z) / \partial x$, где τ_{xz}^p — уравнивающий сдвиг ($\tau_{xz}^p = \tau_{xz}^s + \tau_{xz}^d$), τ_{xz}^s — депланационный сдвиг; $\tau_{xz}^d = 0$.

Совместное решение (3)–(7) дает

$$\int_P \left\{ [v'_n(z) + \alpha_n v_n(z)] \cos \alpha_n x - \frac{1-\nu}{2} \alpha_n v'_n(z) \sin \alpha_n x \right\} \cos \alpha_n x dF + \\ + \frac{1-\nu}{2} \alpha_n \int_P [u_n(z) - \alpha_n v_n(z)] \sin^2 \alpha_n x dF = 0, \quad (8)$$

$$\int_P [v'_n(z) - \alpha_n v'_n(z) \sin^2 \alpha_n x] dF - \alpha_n \int_P [\alpha_n u_n(z) + \nu v'_n(z)] \cos^2 \alpha_n x dF + \\ + \frac{1-\nu}{2} \alpha_n \int_P [u_n(z) \sin \alpha_n x \cos \alpha_n x] dF = 0, \quad (9)$$

Учитывая, что в подоконной части отсутствуют внешние нагрузки, можно принять второе допущение: $u_n(z) = \text{const}$, ($u'_n(z) = 0$). Следовательно, интегрируя (8), получаем

$$v'_n(z) + 2\omega_n v'_n(z) - \alpha_n^2 v_n(z) = 0, \quad (10)$$

где

$$2\omega_n = \frac{1-\nu}{2} \alpha_n \frac{1 - \cos 2\alpha_n c}{2\alpha_n c + \sin 2\alpha_n c}, \quad \alpha_n^2 = \frac{1-\nu}{2} \alpha_n^2 \frac{2\alpha_n c - \sin 2\alpha_n c}{2\alpha_n c + \sin 2\alpha_n c}.$$

Так как (10) удовлетворяет любому из корней характеристического уравнения, то, учитывая условия задачи, решение можно записать в виде

$$v_n(z) = C_{1n} \exp\{-(\omega_n - \gamma_n)z\} - C_{2n} \exp\{-(\omega_n + \gamma_n)z\}, \quad (11)$$

где

$$\gamma_n^2 = (\omega_n^2 + \alpha_n^2)^{1/2}.$$

Значения C_{1n} и C_{2n} определяются из граничных условий

$$v_n(z)|_{z=0} = v_{\max}, \quad v'_n(z)|_{z=0} = 0;$$

$$C_{1n} = -v_{\max} \frac{\exp(-\gamma_n h)}{2\sinh \gamma_n h}, \quad C_{2n} = v_{\max} \left[\frac{\exp(-\gamma_n h)}{2\sinh \gamma_n h} + 1 \right].$$

Подставляя значения ϵ_{xx} и ϵ_{zz} в (11) и учитывая (3), находим

$$\tau(x, z) = \tau_{\max} \exp[-(\omega_n + \gamma_n)z] \left\{ 1 - \frac{\operatorname{sh} \gamma_n z}{\operatorname{sh} \gamma_n h} \exp[-\gamma_n(h-z)] \right\} \cos \alpha_0 x \quad (12)$$

Контактные деформационные касательные напряжения $\tau_k^+(0, z)$ будут также затухать по оси z по тому же показательному закону, что и продольные деформации $\epsilon(x, z)$, т. е.

$$\tau_k^+(0, z) = \tau_{\max}^+ \exp[-(\omega_n + \gamma_n)z] \left\{ 1 - \frac{\operatorname{sh} \gamma_n z}{\operatorname{sh} \gamma_n h} \exp[-\gamma_n(h-z)] \right\}. \quad (13)$$

Таким образом, в зонах деформационного сдвига для касательных напряжений получили показательный затухающий закон, что соответствует результатам экспериментов на фрагментах стеновых панелей, выкопанных из различных материалов [2].

В формуле (13) остается определить $\tau_{\max}^+$, значение которого находим из условия равновесия

$$\int_0^h \tau_k^+(0, z) dz = p_0 c. \quad (14)$$

Совместно решая (13) и (14), получаем

$$\tau_{\max}^+ = p_0 c \left\{ \frac{1 - \exp[-(\omega_n + \gamma_n)h]}{\omega_n + \gamma_n} - \frac{\gamma_n \operatorname{ch} \omega_n h - \omega_n \operatorname{sh} \omega_n h - \gamma_n \exp(-\gamma_n h)}{\omega_n^2 \operatorname{sh} \gamma_n h} \right\}^{-1}. \quad (15)$$

Чтобы определить коэффициент концентрации напряжения в углах ($x=0$), где максимальные сжимающие деформации переходят в деформации деформационного сдвига и где напряжение $\tau_{\max}$ незначительно, справедливо $\tau_{\max} \approx 2\tau_{\max}^+$. Таким образом, коэффициент концентрации напряжений для рассматриваемой модели будет

$$K = 2c \left\{ \frac{1 - \exp[-(\omega_n + \gamma_n)h]}{\omega_n + \gamma_n} - \frac{\gamma_n \operatorname{ch} \omega_n h - \omega_n \operatorname{sh} \omega_n h - \gamma_n \exp(-\gamma_n h)}{\omega_n^2 \operatorname{sh} \gamma_n h} \right\}^{-1}. \quad (16)$$

Чтобы оценить значения деформационно-сдвигающих напряжений и коэффициент концентрации, рассмотрим пример. Пусть: $l = 150$ см, $c = 50$ см, $\alpha_0 = 1,10$, $h = 70$ см, $\mu = 1$, тогда: $\omega = 0,002$ см⁻¹, $\gamma^2 = 0,66 \cdot 10^{-4}$ см⁻² и $\tau_{\max}^+ = 1,425 p_0$, $\tau_{\max} = 2,85 p_0$, $k = 2,85$.

газа при его транспортировке, которые составляют расходную часть баланса энергии—потерь. Система газопроводов является потребителем энергии и в них происходят необратимые потери работоспособности сжатого газа, связанные с преодолением гидравлических сопротивлений газопроводов и компрессорных станций (КС), радиационным газом в пунктах его потребления, передачей сжатого газа другими газотранспортными предприятиями и др. Поскольку потери потенциальной энергии сжатого газа в условиях полной его сохранности в расчетах режимов работы ГТС [1–3] и в других техникоэкономических расчетах не учитываются, это приводит к полному его обесцениванию. Именно эти потери, для компенсации которых на КС расходуется значительное количество топлива и электроэнергии, являются, по существу, главными факторами в транспорте газа, которые до настоящего времени оказались нераскрытыми. Их можно значительно уменьшить путем наилучшего распределения давлений узлов ГТС, выбора наименьших значений давлений на входе городских распределительных станций (ГРС), наибольшего значения давлений на выходе КС и т. д. Поэтому возникает необходимость рассмотрения вопросов экономичности использования располагаемой энергии сжатого газа для его трубопроводного транспорта.

ГТС является единым энергетическим объектом и имеет приходную часть баланса—энергии, которая складывается из энергии, передаваемой газовому потоку в КС, энергии потоков газа, поступивших в газопровод из других газотранспортных предприятий и объединений, подземных хранилищ газа (ПХГ), месторождений газа, имеющих высокое пластовое давление и др. В соответствии с этим в [4, 5] предложено энергетическое уравнение баланса мощностей для гидравлических цепей ГТС, которое одновременно выражает закон сохранения энергии для этой же цепи. На основе этого уравнения в настоящей работе рассматривается метод расчета оптимального поточкораспределения установившихся режимов сложных ГТС.

Выделим из балансового уравнения мощностей гидравлической цепи ГТС [4, 5] слагаемые, соответствующие потерям энергии (мощности) в газопроводах, и вычлени энергии КС газовому потоку как целевую функцию

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_i A_{ij} P_i. \quad (1)$$

Потребуем, чтобы сумма (1) достигала минимума при выполнении ограничений в виде уравнения гидравлического состояния ГТС, т. е. уравнения материального баланса

$$\sum_{i=1}^n A_{ij} Q_i = q_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

и уравнения гидравлического состояния газопроводных участков и участков с КС, которые можно представить как

$$\sum_{j=1}^s \bar{A}_{ij} P_j^2 - \bar{K}_i Q_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

а также технологических ограничений в виде неравенств

$$P_j < P_j < \bar{P}_j, \quad j \in S. \quad (4)$$

Для дальнейших рассуждений из (2) и (3) получим нелинейную систему удобно представить в неявной форме

$$F_k(P_k, P_r, q_r) = 0, \quad (5)$$

$$k = j = 1, 2, \dots, m, \quad r = m + 1, m + 2, \dots, s.$$

В оптимизационной задаче (1), (4), (5) требование минимума целевой функции одновременно приводит к максимизации энергии сжатого газа, выдаваемой КС в систему, что приводит к нахождению наиболее возможных высоких давлений на выходах КС. Таким образом, в задаче (1), (4), (5) минимум целевой функции достигается за счет наилучшего распределения давления в узловых точках ГТС. Для решения этой задачи используется метод Лагранжа с применением штрафных функций.

$$\Phi = \pi \sum_{k=1}^m \lambda_k P_k + \frac{1}{2} \sum_{j \in S} B_j (P_j - \bar{P}_j)^2 + \frac{1}{2} \sum_{j \in S} B_j (P_j - \underline{P}_j)^2, \quad (6)$$

где λ_k — множители Лагранжа, $\bar{B}_j, \underline{B}_j$ — постоянные коэффициенты штрафа.

Учитывая, что

$$P_j = |P_k - P_r|^l, \quad q_r = |q_k - q_r|^l,$$

$$j = 1, 2, \dots, s, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad r = m + 1, m + 2, \dots, s,$$

необходимые условия, которым должны удовлетворять оптимальные значения P_k, P_r , в матричной форме представим как

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_k} = -q_k + \lambda_k^t \frac{\partial F_k}{\partial P_k} + \bar{B}_k (P_k - \bar{P}_k) + \underline{B}_k (P_k - \underline{P}_k) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_r} = -q_r + \lambda_r^t \frac{\partial F_r}{\partial P_r} + \bar{B}_r (P_r - \bar{P}_r) + \underline{B}_r (P_r - \underline{P}_r) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial q_r} = F_r(P_k, P_r, q_r) = 0. \quad (9)$$

$$k = 1, 2, \dots, m, \quad r = m + 1, m + 2, \dots, s,$$

В вышеприведенных формулах верхние индексы t означают знак транспонирования. В (7) производная $\partial F_k / \partial P_k$ представляет собой транспонированную невырожденную матрицу Якоби системы

функции F_s относительно переменных P_s . Нелинейная система (7)–(9) имеет $(m + s)$ уравнений и неизвестными величинами являются P_s, P_r, q_s , число которых также равно $(m + s)$. Оптимальные значения векторов P_s, P_r и Q_s можно получить однократным решением (7)–(9), что связано с определенными трудностями математического характера. Для преодоления этих трудностей в работе рассматривается рациональный алгоритм машинной реализации данной задачи, при которой переменные P_s разделяются на условно зависимые P_k и независимые P_r переменные. Далее при решении системы строится такой итерационный процесс расчета между переменными P_s и P_r , при котором появляется возможность использования известных традиционных методов и готовых программ для гидравлического расчета систем транспорта газа и стандартной программы расчета систем линейных алгебраических уравнений.

Для этой цели можно использовать, например, методику [3] и программное средство «Гидравлический расчет газотранспортной системы с применением уравнений узловых давлений», разработанное авторами. Нелинейная система (7)–(9) на ЭВМ решается примерно так.

1. На первом шаге итерации в системе (9) задается начальное значение вектора P_r .
2. Решается задача гидравлического расчета ГТС и находятся значения векторов P_s и q_s .
3. По найденным значениям P_s и заданным значениям P_r из (3) определяется Q_s для данного шага.
4. По известным P_s, P_r и Q_s находят числовые значения элементов матрицы Якоби, входящей в (7).
5. Решается система линейных алгебраических уравнений (7) и находится значение вектора P_r .
6. По полученным P_s и q_s из (8) рассчитываются значения P_k для второго шага итерации.
7. Найденное значение P_r подставляется в (9) и повторяются пункты 1, 2, 3 и т.д.
8. Итерационный процесс считается законченным и оптимальные значения P_k, P_r, Q_s найденными, когда разность переменных между двумя соседними шагами по абсолютной величине меньше или равна заданной величине точности расчета.

Рассмотренный алгоритм реализован на алгоритмическом языке ПЛ-1 и ориентирован для работы на ЭВМ серии ЕС. После решения оптимизационной задачи (1), (4), (5) и нахождения оптимальных значений потоков газа на участках и давлений в узловых точках системы можно перейти к решению задачи нижнего уровня иерархии по определению соответствующих параметров управления КС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берман Р. Я., Панкратов В. С. Автоматизация систем управления магистральными газопроводами.—Л.: Недра, 1978.—157 с.

2. Бобровский С. А., Шербаков С. Г., Яковлев Е. Н. и др. Трубопроводный транспорт газа.—М.: Наука, 1976—495 с.
3. Акопян С. Г. Расчет потоков, распределения стационарного режима газотранспортной системы // Проблемы совершенствования и развития прогрессивных технико-экономических норм и нормативов в газовой промышленности: Сб. науч. тр.—М.: ВНИИГАЗПРОМ, 1989—С. 81—91.
4. Акопян С. Г. Модифицированная форма теоремы Геллсдена применительно к гидравлическим цепям систем транспорта газа // Изв. АН АрмССР, Сер. ТН.—1989—Т. XLII, № 2.—С. 64—67.
5. Акопян С. Г., Акопян М. С. О новой закономерности распределения основных параметров гидравлических цепей газотранспортных систем // Разработка и усовершенствование энерго- и ресурсосберегающих систем и технологий: Межауз. сб. науч. тр. / ГрПИ, Ереван, 1989—С. 59—62.

ЕрлИИ

28. X. 1989

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 1, 1991, с. 21—25

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1.001.24

Э. А. ЭТМЕКЧЯН, В. П. АРАКЕЛЯН, ФАХАТ АЛЬ ГАЛЛЕТ

ОБ ОДНОМ ГИБРИДНОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Предлагается $Y-Z$ метод расчета установившегося режима, который позволяет решить задачу при любой форме задания исходной информации относительно стационарных узлов. Разработан вычислительный алгоритм для численного решения задачи.

Табл. 1. Библиогр.: 4 назв.

Հաշվարկ եղանակ է էլեկտրական համակարգի հաստատված ռեժիմը հաշվարկելու, երբ եւս պահանջ մուտք ներկայացվում է $Y-Z$ մատրիցային տեսքով: Գերադաս նախադրությունն է լուծելու խնդիրը, երբ հաստատված հանգույցի համար տրված են ինքնուրույն մոդուլը ու արգումենտը, արժեքն էլ տրված ու սկզբնական հարաբերակցությամբ Y -մատրիցը ներկայացվում է Y -մեթոդի խնդիր լուծելու:

Предположим, что исследуемая электрическая система состоит из $M+1$ узловых точек, а после выторм одного узла в качестве базисного она будет состоять из M независимых узлов [1—3]. Принимается следующая система индексов для узлов типа: $L' = 0, \dots, \Gamma - 1$, $P = L' + m$, $m = 1, 2, \dots, \Gamma - P$, $Q = \Gamma + 1, \dots, \Gamma + 2, \dots, \Gamma + N = M$. На основании выбранной системы индексов уравнения состояния электрической системы в $Y-Z$ форме можно представить в следующем виде [3]:

$$\bar{I}_m = \bar{I}_{0m} + \sum_{n=1}^{\Gamma} Y_{m,n} \bar{U}_n + \sum_{l=\Gamma+1}^M A_{m,l} \bar{I}_l, \quad (1)$$

$$\bar{U}_n = \bar{E}_n + \sum_{m=1}^{\Gamma} Z_{n,m} \bar{U}_m + \sum_{l=\Gamma+1}^M Z_{n,l} \bar{I}_l, \quad (2)$$

где U_n, I_m, U_k, I_l — комплексные напряжения и токи узлов типа $P=U$ и $P=Q$ соответственно. Параметры $Y_{m,n}, A_{m,l}, C_{k,n}$ и $Z_{l,i}$ определяются выражениями, приведенными в [3]. С другой стороны величины I_{lm} и U_{lk} определяются как

$$I_{lm} = - \sum_{n=1}^r Y_{m,n} U_n, \quad U_{lk} = \left(1 - \sum_{n=1}^r C_{k,n} \right) U_n. \quad (3)$$

Из уравнений тока (1) и напряжений (2) переходя к мощностям, получаем

$$\Phi_{pm} = P_m - [P_{lm} + \Phi_{pm}(U_n, U_{lm})] = 0, \quad (4)$$

$$\Phi_{qm} = Q_m - [Q_{lm} + \Phi_{qm}(U_n, U_{lm})] = 0, \quad (5)$$

а также

$$\Phi_{pk} = P_k - [P_{lk} + \Phi_{pk}(U_l, I_l)] = 0, \quad (6)$$

$$\Phi_{ql} = Q_l - [Q_{lk} + \Phi_{ql}(I_l, I_l)] = 0, \quad (7)$$

где

$$\Phi_{pm}(U_n, U_{lm}) = U_n \sum_{n=1}^r [g_{m,n} \cos(\varphi_{lm} - \varphi_{un}) + b_{m,n} \sin(\varphi_{lm} - \varphi_{un})] U_n, \quad (8a)$$

$$\Phi_{qm}(U_n, U_{lm}) = U_n \sum_{n=1}^r [g_{m,n} \sin(\varphi_{lm} - \varphi_{un}) - b_{m,n} \cos(\varphi_{lm} - \varphi_{un})] U_n. \quad (8b)$$

Функции Φ_{pm} и Φ_{qm} определяются согласно [3]. Величины P_{lm} и Q_{lm} рассчитываются по формулам

$$P_{lm} = P_{lm} + \sum_{l=1}^R (H_{m,l} \cos \varphi_{lm} + K_{m,l} \sin \varphi_{lm}) U_m, \quad (9a)$$

$$Q_{lm} = Q_{lm} + \sum_{l=1}^R (H_{m,l} \sin \varphi_{lm} - K_{m,l} \cos \varphi_{lm}) U_m, \quad (9b)$$

где

$$P_{lm} = - \sum_{n=1}^r (g_{m,n} \cos \varphi_{lm} + b_{m,n} \sin \varphi_{lm}) U_n U_m, \quad (10a)$$

$$Q_{lm} = - \sum_{n=1}^r (g_{m,n} \sin \varphi_{lm} - b_{m,n} \cos \varphi_{lm}) U_n U_m. \quad (10b)$$

С другой стороны

$$H_{m,l} = a_{m,l} I_l - a_{m,l}^* I_l^*, \quad K_{m,l} = a_{m,l} I_l^* + a_{m,l}^* I_l, \quad (11)$$

а величины P_{lk} и Q_{lk} определяются как

$$P_{lk} = P_{lk} + \sum_{n=1}^r (M_{k,n} \cos \varphi_{ln} + L_{k,n} \sin \varphi_{ln}) U_n, \quad (12a)$$

$$Q_{ik} = q_{ik} + \sum_{n=1}^l (M_{k,n} \sin \varphi_{un} - L_{k,n} \cos \varphi_{un}) U_n. \quad (12)$$

Здесь P_{ik} и q_{ik} рассчитываются согласно [3], а $M_{k,n}$ и $L_{k,n}$ — нижеприведенными выражениями

$$M_{k,n} = c_{k,n} I_k + c_{k,n}^* I_n, \quad L_{k,n} = c_{k,n}^* I_k - c_{k,n} I_n. \quad (13)$$

Поскольку независимые стационарные узлы являются узлами типа $P-U$, то из систем уравнений (4) — (7) уравнение реактивной мощности (5) становится лишним и в результате остаются (4) и (6), (7).

Относительно уравнения (4) можно написать следующее рекуррентное выражение, вытекающее из метода Ньютона — Рафсона:

$$[\varphi_{un}]^{n+1} = [\varphi_{un}]^n - \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \varphi_{un}} \right]_n^{-1} \times [\Phi_{pn}(\varphi_{un})], \quad (14)$$

где n — номер итерации.

Настоящая статья отличается от [3] тем, что вместо рекуррентного выражения (13), приведенного в указанной работе, используется (14), в котором матрица Якоби имеет порядок на два раза меньше. Рекуррентное выражение относительно систем уравнений (6), (7) имеет вид

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_n \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} I_k \\ I_n \end{bmatrix}^n - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pA}}{\partial I_k} & \frac{\partial \Phi_{pA}}{\partial I_n} \\ \frac{\partial \Phi_{pA}}{\partial I_k} & \frac{\partial \Phi_{pA}}{\partial I_n} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Phi_{pA} \\ \Phi_{pA} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Частные производные, входящие в матрицу Якоби рекуррентного выражения (14), определяются

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \varphi_{un}} = & \left\{ P_{(m,n)} - U_m \sum_{n=1}^l [g_{m,n} \sin(\varphi_{um} - \varphi_{un}) - \right. \\ & \left. - b_{m,n} \cos(\varphi_{um} - \varphi_{un})] U_n \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

а когда $n = m$ —

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \varphi_{un}} = U_m [g_{m,n} \sin(\varphi_{um} - \varphi_{un}) - b_{m,n} \cos(\varphi_{um} - \varphi_{un})] U_n. \quad (17)$$

В (16) величина $P_{(m,n)}$ определяется по формуле

$$P_{(m,n)} = P_{(m,n)} + P_{(n,n)}^*, \quad (18)$$

где

$$P_{(m,n)} = \sum_{n=1}^l (g_{m,n} \sin \varphi_{un} - b_{m,n} \cos \varphi_{un}) U_n U_m, \quad (19)$$

$$P_{(n,n)}^* = - \sum_{l=1}^N (H_{n,l} \sin \varphi_{un} - K_{n,l} \cos \varphi_{un}) U_n. \quad (20)$$

Нетрудно заметить, что для формирования матрицы Якоби рекуррентного выражения (14) требуется установить всего лишь два типа частных производных, что не вызывает никаких затруднений.

Частные производные, входящие в матрицу Якоби выражения (15), определяются при одинаковых индексах (т. е. когда $k = l$) с помощью выражений (19a) — (19c), (20), а при разных индексах ($k \neq l$) — с помощью выражений, приведенных в [3]. Однако величины U_k и U_{k+1} , входящие в (19a) — (19c), определяются как

$$U_k = \left(1 - \sum_{a=1}^r G_{k,a}\right)U_k + \sum_{a=1}^r (G_{k,a} \cos \alpha_{ka} - G_{k,a} \sin \alpha_{ka})U_{a1} \quad (21)$$

$$U_{k+1} = \sum_{a=1}^r G_{k+1,a}U_a + \sum_{a=1}^r (G_{k+1,a} \sin \alpha_{k+1,a} - G_{k+1,a} \cos \alpha_{k+1,a})U_{a1} \quad (22)$$

Заметим, что $G_{k+1,a}$ и $G_{k,a}$ и $\alpha_{k+1,a}$, $\alpha_{k,a}$, входящие в эти выражения, являются действительными и мнимыми составляющими комплексных величин $\dot{A}_{k+1}$ и $\dot{A}_{k,a}$.

Для иллюстрации предложенного метода рассмотрим простую электрическую систему, состоящую из четырех узловых точек, исходная информация относительно несивающей части которой приводится в [1]. Применительно к исследуемой электрической системе рекуррентные выражения (14) и (15) соответственно принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\Psi_{a1}}{\Psi_{a2}} \right| &= \left| \frac{0}{0} \right| = \left| -\frac{0,0040179}{0,0043907} - \frac{0,0439077}{-0,0000169} \right| \times \\ &\times \left| \frac{39,1421}{29,8450} \right|. \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \left| \frac{I_1}{I_2} \right| &= \left| \frac{1,962182}{0,981181} \right| = \left| \frac{-206,6242}{34,6495} - \frac{-3,7607}{204,9827} \right| \times \\ &\times \left| \frac{-13,9701}{27,1451} \right|. \end{aligned} \quad (24)$$

Общая матрица, входящая в (23), (24), получаем $\Psi_{a1} = -0,39^\circ$, $\Psi_{a2} = 0,39^\circ$, $(I_1)^* = -2,079336$, $(I_2)^* = 1,175478$. Полученные численные значения используются для организации новой итерации. Итерационный процесс считается завершенным, когда обеспечиваются условия

$$|\Phi_{a1} - P_{a1} - [P_{a1} - \Phi_{a1}(U_1, U_{a1})]| \leq \Delta P_{a1} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} |\Phi_{a2} - P_{a2} - [P_{a2} - \Phi_{a2}(U_1, U_{a1})]| &\leq \Delta P_{a2}, \\ |\Phi_{12} - Q_{12} - [Q_{12} + \Phi_{12}(U_1, U_{a1})]| &\leq \Delta Q_{12}. \end{aligned} \quad (26)$$

Несимметрия роторной цепи может быть заложена в машину при проектировании, но она может возникнуть также и в процессе эксплуатации из-за повреждений элементов короткозамкнутой клетки. Принятая в [1, 2] запись уравнений в осях d и q обладает определенными неудобствами при практических расчетах. В настоящей статье приводятся уравнения, записанные в форме, не зависящей от ориентации осей относительно ротора. Рассмотрим асинхронную машину с симметричной короткозамкнутой клеткой на роторе. Принимаем допущения, обычные для теории синхронных машин. Дифференциальные уравнения напряжений обмоток статора и ротора в неподвижных осях согласно [3] в матричной форме могут быть записаны в следующем виде:

$$[u_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\Psi_s], \quad (1)$$

где матрицы напряжений и токов имеют форму столбцов, а матрица сопротивлений является диагональной. Матрица потокосцеплений равна

$$[\Psi_s] = [L_s] \cdot [i_s], \quad (2)$$

где матрица $[L_s]$ квадратная, состоящая из индуктивностей и взаимных индуктивностей. Общее число уравнений напряжения будет равно $(m_1 + m_2)$, где $m_1 = 3$ — число фаз статора, m_2 — число фаз ротора. Благодаря симметрии фазных обмоток статора вместо трех фаз можно рассматривать только одну с учетом полей взаимной индукции с другими фазами, при этом число уравнений становится равным $(1 + m_2)$.

Активные сопротивления фазы статора и контуров ротора, амплитуды взаимных индуктивностей и индуктивности рассеяния, входящие в уравнения (1) и (2), определяются по формулам, приведенным в [3, 4]. Однако взамен постоянного коэффициента насыщения k_m магнитной цепи, в эти формулы введем переменную величину, зависящую от скольжения

$$k_m(s) = k_{m0} + (1 - k_{m0})s, \quad (3)$$

где k_{m0} — коэффициент насыщения при синхронном вращении ротора, когда скольжение $s = 0$.

Матричное уравнение (1) записано в неподвижных осях координат и поэтому имеет периодические коэффициенты. Чтобы получить уравнения с постоянными коэффициентами, запишем их в системе осей, вращающихся с синхронной скоростью. Согласно [3] для установившегося режима работы машины из (1) получаем уравнения в комплексной форме для статора и n -го контура ротора

$$\dot{U}_s = Z_{s1} I_s + Z_{s2} I_1 + \dots + Z_{sn} I_n + \dots + Z_{sm} I_m, \quad (4)$$

$$0 = Z_{n1} I_s + Z_{n2} I_1 + \dots + Z_{nn} I_n + \dots + Z_{nm} I_m, \quad (5)$$

где I_s — ток фазы статора, а $I_1, \dots, I_n, \dots, I_m$ — токи контуров беличьей клетки ротора.

Полное сопротивление фазы статора при разомкнутых контурах ротора равно

$$Z_{st} = R_s + j(X_m + X_1), \quad (6)$$

где R_s — активное сопротивление фазы, X_m — индуктивное сопротивление, обусловленное полями взаимной индукции фазы с контуром ротора по [3], X_1 — индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора по [3].

Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в контурах ротора ЭДС, которые имеют одинаковую амплитуду, но сдвинуты по фазе на угол α , равный пространственному углу между контурами ротора. Сопротивления взаимной индукции между контурами ротора и фазой статора будут иметь следующий вид:

$$\text{для 1-го контура ротора} \quad Z_{s1} = j\omega L_m K k_{s1} e^{j\alpha}, \quad (7)$$

$$\text{для } n\text{-го контура ротора} \quad Z_{sn} = j\omega L_m K k_{sn} e^{jn\alpha}. \quad (8)$$

Для ротора отсчет углов от осей его контуров по отношению к оси фазы (А) статора ведется в обратном направлении. Сопротивления взаимной индукции между фазой статора и контурами ротора определяются по формулам

$$\text{для 1-го контура ротора} \quad Z_{1s} = -j\omega L_m K k_{s1} e^{-j\alpha}, \quad (9)$$

$$\text{для } n\text{-го контура ротора} \quad Z_{ns} = -j\omega L_m K k_{sn} e^{-jn\alpha}, \quad (10)$$

где k_{sn} — коэффициент связи назван [4].

Коэффициент трансформации ЭДС между контуром ротора и фазой статора в комплексной форме имеет вид:

$$K = K e^{-j\frac{1}{2}(\pi-\alpha)}, \quad \dot{K} = K e^{j\frac{1}{2}(\pi-\alpha)}, \quad K = \sin \alpha \cdot 2 W_s k_{s1},$$

где W_s и k_{s1} — число витков и обмоточный коэффициент фазы статора. Если электрический угол $\alpha < 20^\circ$, то $e^{\pm j\frac{1}{2}(\pi-\alpha)} \approx 1$ и после преобразований выражения (7)–(10) принимают вид [5]. Полное сопротивление n -го контура ротора Z_{nn} , его взаимное сопротивление с $(n-1)$ контуром $Z_{n,n-1}$ и i -ым контуром Z_{ni} (где $i = n, n-1$) определяются согласно [5].

Рассмотрим теперь асинхронную машину с несимметричной короткозамкнутой клеткой на роторе. Обычно принимают, что дефект стержня обусловлен увеличением его активного сопротивления, а индуктивное сопротивление считают неизменным. Активное сопротивление n -го дефектного стержня представим как сумму активного сопротивления R_{sn} стержня при отсутствии дефекта и добавочного сопротивления ΔR_{sn} .

Несимметричная многофазная система токов ротора разлагается на симметричные составляющие прямой, обратной и промежуточных последовательностей. Проведенные расчеты показывают, что токи статора, обусловленные токами промежуточных последовательностей ротора, пренебрежимо малы, поэтому можно допустить, что в статоре существуют токи основной частоты f и $f_{0s} = (i-2s)f$, обусловленные токами обратной последовательности ротора. Принимаем, что ток частоты f_{0s} существует в отдельном, независимом контуре статора, который не имеет электромагнитной и электрической связи с контуром тока частоты f , но связан электромагнитно с контурами ротора. Можно принять также, что самоиндуктивность этого контура и его взаимоиндуктивности с контурами ротора остаются такими же, как и для контура основной частоты. Будем учитывать, что для обратного поля направление обхода контуров ротора изменяется на обратное, а в формулах типа (7) — (10) применительно к контуру токов частоты f_{0s} комплексный коэффициент трансформации K заменяется на сопряженный K^* и наоборот. Напряжение на зажимах контура тока частоты f_{0s} уравнивается падением напряжения во внешней цепи. Оно обычно невелико и может быть принято равным нулю. Поле ротора, созданное токами ротора обратной последовательности, перемещается относительно статора в обратном направлении при $s > 0.5$. Будем считать, что частота тока статора при этом является положительной и равной $(2s-1)f$.

Уравнения напряжений контура частоты f_{0s} и n -го контура ротора с учетом их взаимной связи будут иметь следующий вид:

$$0 = Z_{s0s} I_{0s} + Z_{0s1} I_1 + \dots + Z_{0sn} I_n + \dots + Z_{0sm} I_m, \quad (11)$$

$$0 = Z_{ns1} I_1 + Z_{ns0} I_{0s} + Z_{nn} I_n + \dots + Z_{nn1} I_1 + \dots + Z_{nm1} I_m. \quad (12)$$

Здесь

$$Z_{s0s} = R_s + j(2s-1)(X_m + X_s),$$

$$Z_{nsn} = j \frac{1}{m_1} (2s-1) X_m K k_{ek} e^{-j\alpha_n}, \quad Z_{ns0} = jK X_m K k_{ek} e^{j\alpha_n}$$

При несимметрии роторной цепи уравнение напряжений статора (4) для токов основной частоты остается без изменения. Записав уравнения (4), (11) и (12) для всех контуров ротора, получим полную систему $(2+m_2)$ уравнений асинхронной машины с несимметричной короткозамкнутой клеткой. При этом в выражения для сопротивлений $Z_{n,n-1}$, Z_{nn} и $Z_{n,n+1}$, соответствующие дефектным стержням, должны быть введены дополнительные активные сопротивления ΔR_n .

Решение системы уравнений было выполнено на ЭВМ методом исключения (Гаусса) для экспериментального двигателя на базе АОЛ22-2 (габаритная мощность 600 Вт, 380/220 В, 2800 об/мин). Клетка ротора состояла из 18 медных стержней и латунных колец, напаянных на сердечник ротора. Сопротивления нормального

стержня: активное— $1,736 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}$, индуктивное— $1,77 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}$, сегмента кольца: активное— $1,618 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$, индуктивное— $1,252 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$, а индуктивное сопротивление взаимной индукции $X_m = 422 \text{ Ом}$. Расчеты и эксперименты проводились при линейном напряжении 240 В и симметрии короткозамкнутой клетки, а также для случаев обрыва стержней от 3 до 7, расположенных рядом друг с другом. В расчетах применялись скольжения от 1 до 0. Как видно (рис.), расчетные значения ничем не отличались от экспериментальных. Расчеты и измерения проводились при изтоке статора практически совпадают с измеренными (рис.), что подтверждает правильность примененного подхода и приемлемость допущений.

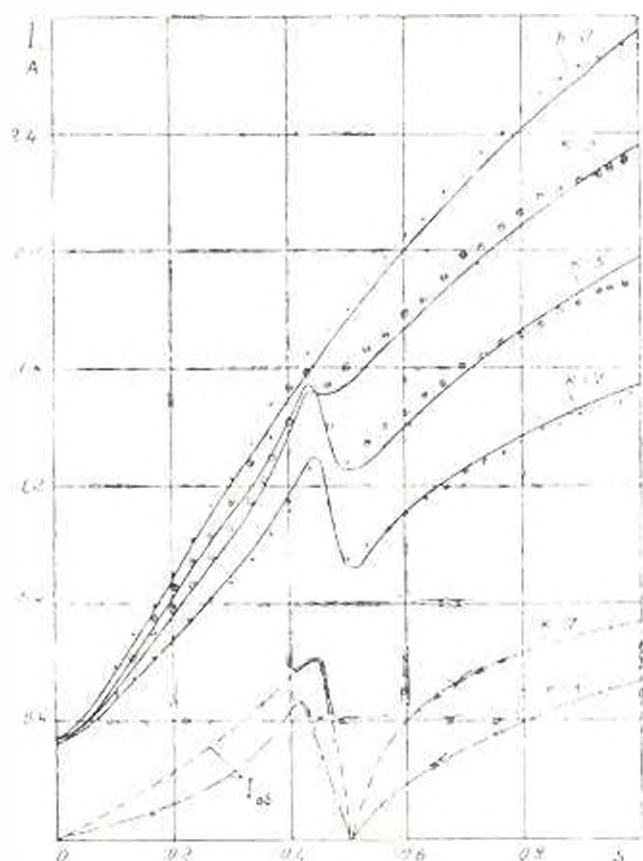


Рис. Зависимость полного тока и тока частоты I_{ω} статора от скольжения при разных числах оборванных стержней k ротора с изолированной клеткой. Опытные данные: $\times$ — $k = 0$, $\circ$ — $k = 3$, $\bullet$ — $k = 5$, $\triangle$ — $k = 7$, — — — расчет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов И. И. Электромеханические преобразователи энергии — М. Энергия, 1973. — 400 с.

2. Постников И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин.—М.: Высшая школа, 1975.—319 с.
3. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины.—М.: Энергия, 1980.—928 с.
4. Вольдек А. И. Электрические машины.—М.—Л.: Энергия, 1974.—840 с.
5. Williamson S., Smith A. C. Steady-state analysis of 3-phase cage motors with rotor-bar and end-ring faults/IEEE Proc.—1982 July—V 129, pt. B, № 3.—P. 93—100.

ЕрIII

5 VII 1990

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 1, 1991, с. 30—34

ГИДРАВЛИКА

УДК 532.545

С. М. КАЗАРЯН, Э. К. МУРАДЯН

ДВИЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД К СКВАЖИНЕ В СЛОИСТОЙ ТОЛЩЕ БЕЗ ИНФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ОТКАЧКЕ ИЗ ВЕРХНЕГО И НИЖНЕГО ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

Рассматриваются задачи определения напоров двухслойной неограниченной гидравлически связанной водоносной толщи, разделенной слабопроницаемым слоем, при откачке воды только из верхнего или только из нижнего напорного горизонта с постоянными расходами без инфильтрации поверхностных стоков. Предлагаемые расчетные формулы позволяют разрешить сложные гидродинамические задачи, связанные с осушением и водозабором подземных вод.

Из 1 Библиогр., 3 назв.

Դիֆուզիոն և հիդրափոխան կապի մեջ գտնվող երկու անսահմանափակ ջրառար հոգաբարեւում, որոնք բաժանվում են իրար ցրտափանցելիությամբ աննշող շերտով, ճիշտմանը հաշվարկման ինդիքներ, երբ ջրառար կառարվում է կամ վերին, կամ ներքին ճնշումային շերտից Լատուտուն կերտով, որոնց անսահման է մակերեսային ջրերի ներծծանդումը: Մտադրված հաշվային բանաձևերը հնարավորություն են տալիս լուծելու բարդ հիդրափոխանական ինդիքներ կապված շտրագմուռ և ջրառման օորցների ճնշ:

Проблема использования подземных вод включает целый комплекс сложных научных и инженерных задач, связанных с задачей прогнозирования эксплуатационных запасов подземных вод и производством расчетов водозаборных сооружений. Методы гидродинамических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод, производительности водозаборов и водопонижения разрабатываются на основе общей теории фильтрации, получившей отражение в трудах Н. Е. Жуковского, Н. Н. Павловского, Л. С. Лейбензона, Н. Я. Полубариновой-Кочиной и др. На развитие теории фильтрации оказали влияние задачи экономической разработки нефтяных и газовых запасов, рационального и экономичного выбора схем водопонижения и проектирования осушительных и оросительных систем. Нами такое исследование выполнено применительно к условиям Ариатского артезианского бассейна с двумя напорными водоносными горизонтами.

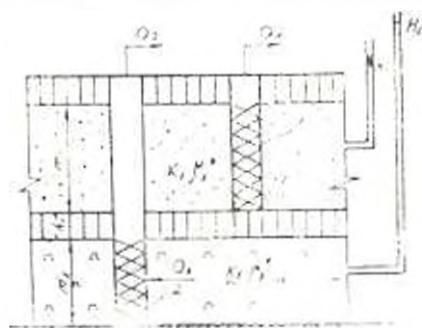
Задача откачки из скважины, заложенной в многослойной неограниченной фильтрующей среде, рассматривается как осесимметричная неустановившаяся фильтрация. Процесс неустановившейся фильтрации в трехслойной гидравлической связанной среде без учета инфильтрации поверхностных вод и с учетом перетекания при жестком режиме в раздельном слое описывается системой дифференциальных уравнений [1]

$$a_i \varphi S_i - b_i (S_i - S_j) = \frac{\partial S_i}{\partial t}, \quad a_j \varphi S_j - b_j (S_j - S_i) = \frac{\partial S_j}{\partial t}, \quad (1)$$

где

$$a_i = T_i \mu_i^*, \quad b_i = c_i h_i \mu_i^*, \quad b_j = c_j h_j \mu_j^*, \quad S_i(r, t) = H_{ic} - H_i(r, t), \quad (2)$$

a_i — коэффициент проницаемости верхнего ($i=1$) и нижнего ($i=2$) напорных горизонтов; b_i — коэффициент перетекания; $S_i(r, t)$ — понижения уровня подземных вод на расстоянии r от скважины в 1-м и 2-м напорном водоносном слоях в момент времени t ($i=1, 2$); $H_i(r, t)$ — пьезометрические напоры для тех же слоев в течение отбора воды; H_{ic} — их значения в естественных условиях; m_i , K_j , μ_i^* , Q — соответственно мощности, коэффициенты фильтрации, упругой водоотдачи и расхода жидкости, поступающей в скважину для водоносных слоев; h_i и c_i — мощность и коэффициент фильтрации раздельного слоя; φ — обозначение лачласиана в цилиндрических координатах.



Рис

Решение системы (1) ищется при следующих краевых условиях.

Задача 1. Отбор воды осуществляется только из верхнего напорного горизонта с постоянным расходом Q_1 (рис.). Начальные условия:

$$S_i(r, t) = 0, \quad t = 0 \quad (i=1, 2), \quad (2)$$

а граничные условия:

$$S_i(r, t) = 0, \quad t \geq 0, \quad r \rightarrow \infty,$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} r \partial S_1 / \partial r = -Q_1 / 2\pi T_1 = \text{const}, \quad \lim_{r \rightarrow 0} r \partial S_2 / \partial r = -Q_2 / 2\pi T_2 = 0, \quad (3)$$

Задача 2. Отбор воды осуществляется только из нижнего напорного горизонта с постоянным расходом Q_2 (рис.). Начальные условия:

$$S_i(r, t) = 0, \quad t = 0 \quad (i=1, 2), \quad (4)$$

а граничные условия:

$$S_i(r, t) = 0, \quad t \geq 0, \quad r \rightarrow \infty,$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} r dS_1/dr = -Q_1/2\pi T_1 = \text{const}, \quad \lim_{r \rightarrow 0} r dS_2/dr = -Q_2/2\pi T_2 = 0, \quad (5)$$

где $T_i = (\lambda m) i$ — гидрорезистивность подповерхностных слоев.

Применяя к уравнениям (1) преобразование Лапласа по времени t , получаем линейную однородную систему обыкновенных дифференциальных уравнений [1, 3]. Решение ее после перехода от изображений к оригиналу с применением теоремы обращения представляется в виде [1, 3]. Для задачи 1

$$S_j^0(r, t) = \frac{1}{2\pi i} \frac{Q_j}{2\pi T_j} \int_{-\infty-i\infty}^{\infty-i\infty} T^2 [\Phi_{j1}^0(\lambda) K_0(\omega_1 r) - \Phi_{j2}^0(\lambda) K_0(\omega_2 r)] d\lambda, \quad (6)$$

$$(j = 1, 2),$$

а для задачи 2:

$$S_j^n(r, t) = \frac{1}{2\pi i} \frac{Q_j}{2\pi T_j} \int_{-\infty-i\infty}^{\infty-i\infty} T^2 [\Phi_{j1}^n(\lambda) K_0(\omega_1 r) - \Phi_{j2}^n(\lambda) K_0(\omega_2 r)] d\lambda, \quad (7)$$

$$(j = 1, 2),$$

где K_0 — функция Макдональда, а $\Phi_{j\alpha}^n(\lambda)$ зависят от гидрогеологических параметров:

$$\begin{aligned} \Phi_{11}^0(\lambda) &= LM_1, \quad \Phi_{11}^1(\lambda) = LM_1^-, \quad \Phi_{12}^0(\lambda) = \Phi_{12}^1(\lambda) = 2LM_1, \\ \Phi_{21}^0(\lambda) &= \Phi_{21}^1(\lambda) = 2LM_2, \quad \Phi_{22}^0(\lambda) = LM_2^-, \quad \Phi_{22}^1(\lambda) = LM_2, \\ \lambda &= 0,5\omega_1^{-1} f(\lambda)^{-1}, \quad M^{\pm} = A_1^0 \pm A_2^0 \mp f(\lambda), \\ M_1 &= AB^0, \quad M_2 = A^0. \end{aligned} \quad (8)$$

В (8) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} A^0 &= a_1 a_2, \quad A_1^0 = A^0 - B^0, \quad B^0 = b_1 b_2, \quad A^{\pm} = A^0 \pm 1, \quad B^{\pm} = B^0 \pm 1, \\ f(\lambda) &= [(A^0 + a^0)^2 - 4A^0(\lambda + B^0)]^{-1}, \quad A_1^0 = A^0 + B^0, \quad a^0 = A^0 + 1, \\ \gamma &= b_1 b_2, \quad \omega_{\pm 1} = [(A^0 + a^0)^2 + f(\lambda)] \gamma / 2\lambda_2]^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Подынтегральные функции (6), (7) имеют точки типа плоских полюсов и точек разветвления [1, 3]. После громоздких выкладок искомые контурные интегралы приводятся к обычным вещественным определенным интегралам, а затем с использованием теоремы о свертке вычисляются все интегралы в (6), (7). Расчетные формулы при этом получаются в виде

$$S_j^0(r, t) = R_j^0(r, t) Q_j / 4\pi T_j, \quad (j = 1, 2), \quad (10)$$

$$S_j^1(r, t) = R_j^1(r, t) Q_j / 4\pi T_j, \quad (j = 1, 2). \quad (11)$$

Здесь $R_i(r, t)$ — безразмерные гидравлические сопротивления, выражающиеся через определенные интегралы, которые нумерованы

ваны для различных значений гидродинамических параметров пластов:

$$R_1^0(r, t) = \frac{1}{2} \int_{B_1^0}^{\infty} \frac{e^{-\rho^2} - 1}{\rho A_1(\rho)} (A_1^0 - N_1 \rho - A_1(\rho)) J_0(\bar{r} A_2(\rho)) d\rho + \\ + \frac{2A^0}{A^0 + B^0} K_0(\bar{r} \sqrt{2A_1^0}),$$

$$R_2^0(r, t) = -B^0 \left[\int_{B_1^0}^{\infty} \frac{e^{-\rho^2} - 1}{\rho A_1(\rho)} J_0(\bar{r} A_2(\rho)) d\rho + \frac{2}{A^0 + B^0} K_0(\bar{r} \sqrt{2A_1^0}) \right],$$
(12)

$$R_1^0(r, t) = A^0 \left[\int_{B_1^0}^{\infty} \frac{e^{-\rho^2} - 1}{\rho A_1(\rho)} J_0(\bar{r} A_2(\rho)) d\rho + \frac{2}{A^0 + B^0} K_0(\bar{r} \sqrt{2A_1^0}) \right],$$

$$R_2^0(r, t) = -\frac{1}{2} \int_{B_1^0}^{\infty} \frac{e^{-\rho^2} - 1}{\rho A_1(\rho)} (A_1^0 - N_1 \rho - A_1^0(\rho)) J_0(\bar{r} A_2(\rho)) d\rho + \\ + \frac{2B_0}{A^0 + B^0} K_0(\bar{r} \sqrt{2A_1^0}).$$

Для максимального понижения имеем

$$S^0(r_0, t) = R(r_0, t) Q_1 / 4\pi T_1, \quad S^0(r_0, t) = R(r_0, t) Q_2 / 4\pi T_2, \quad (14)$$

где

$$R(r_0, t) = \int_{B_1^0}^{\infty} \frac{1 - e^{-\rho^2}}{\rho} J_0(\bar{r}_0 A_2(\rho)) d\rho.$$

В (12), (13) имеются следующие обозначения:

J_0 — цилиндрическая функция первого рода вещественного аргумента,

$$A_1(\rho) = [(A_1^0 - a^0 \rho)^2 + 4A^0 \rho (B_1^0 - \rho)]^{1/2},$$

$$A_2(\rho) = [(a^0 \rho + A_1(\rho) - A_1^0)]^{1/2},$$

$$\bar{r} = (r^2 b_1 / 2A^0 a_1)^{1/2}, \quad \bar{r}_0 = (r_0^2 b_1 / 2A^0 a_1)^{1/2}.$$

Предполагаемые расчетные формулы позволяют решать сложные гидродинамические задачи, связанные с проблемами осушения и использования подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казарян С. М. Водный обмен на фоне вертикального дренажа. — Ереван: Айтастан, 1988. — 268 с.

рого учитывается тот или иной принцип выбора стратегии лица, принимающего решение (ЛПР). Практика показывает, что ЛПР часто склонно пожертвовать значениями некоторых критериев для получения большого выигрыша в целом. Одновременно ЛПР стремится не слишком пренебрегать значениями каждого критерия в отдельности. С учетом последнего постороены стабильные адаптивные алгоритмы [3]. Для краткости в дальнейшем первый принцип будет называться принципом жертв, а второй — принципом порога. При этом возникает необходимость формализовать эти принципы, чтобы сделать обоснованный выбор обобщенного критерия.

Определение. Моментом перехода из точки $x_1 \in X$ в точку $x_2 \in X$ функции $f(x) \geq 0$, $x \in x \in E$, называется величина

$$|f(x_2) - f(x_1)| \text{ или } f(x_1), f(x_2)$$

и обозначается $M(x_1, x_2, f)$.

Свойства момента. 1. Если $f_1(x) \geq 0$, $f_2(x) \geq 0$ заданы на X и $x_1, x_2 \in X$, то из $M(x_1, x_2)f_1 \geq 0$ и $M(x_1, x_2)f_2 \geq 0$ следует, что

$$M(x_1, x_2)f_1f_2 \geq M(x_1, x_2)f_1 + M(x_1, x_2)f_2$$

где f_1f_2 — произведение $f_1(x)f_2(x)$.

Докажем это.

$$\begin{aligned} M(x_1, x_2)f_1f_2 &= \frac{f_1(x_2)f_2(x_2) - f_1(x_1)f_2(x_1)}{f_1(x_1)f_2(x_1)} = \\ &= \frac{f_1(x_2)f_2(x_2) - f_1(x_1)f_2(x_2) + f_1(x_2)f_2(x_1) - f_1(x_1)f_2(x_1)}{f_1(x_1)f_2(x_1)} = \\ &= \frac{f_2(x_2)}{f_2(x_1)} M(x_1, x_2)f_1 - M(x_1, x_2)f_2 \geq M(x_1, x_2)f_1 = M(x_1, x_2)f_2. \end{aligned}$$

Аналогичным образом доказываются следующие свойства.

2. Если $f_1(x) \geq 0$, $f_2(x) \geq 0$ заданы на X и $x_1, x_2 \in X$, то из $M(x_1, x_2)f_1 < 0$ и $M(x_1, x_2)f_2 < 0$ следует, что

$$M(x_1, x_2)f_1f_2 < M(x_1, x_2)f_1 + M(x_1, x_2)f_2.$$

3. Если $f_1(x) \geq 0$, $f_2(x) \geq 0$ заданы на X и $x_1, x_2 \in X$, то из $M(x_1, x_2)f_1 > 0$, $M(x_1, x_2)f_2 < 0$ и $M(x_1, x_2)f_1 > |M(x_1, x_2)f_2|$ следует, что

$$M(x_1, x_2)f_1f_2 < M(x_1, x_2)f_1 - M(x_1, x_2)f_2.$$

4. Если $f_1(x) \geq 0$, $f_2(x) \geq 0$ заданы на X и $x_1, x_2 \in X$, то из $M(x_1, x_2)f_1 > 0$, $M(x_1, x_2)f_2 < 0$ и $|M(x_1, x_2)f_2| > M(x_1, x_2)f_1$ следует, что

$$M(x_1, x_2)f_1f_2 < M(x_1, x_2)f_1 - M(x_1, x_2)f_2.$$

Замечание. Момент $M(x_1, x_2)f \geq 0$ является необходимым и достаточным для выполнения соотношения $f(x_1) \leq f(x_2)$.

Теорема 1. Если $F(x) = f_1(x) \cdot f_2(x) \cdots f_m(x)$, $f_i(x) > 0$, $i = 1, 2, \dots, m$, $x \in X$ и $F(x_1) < F(x_2)$, то

$$M(x_1, x_2)f_1 \cdots f_k < M(x_1, x_2)f_{k+1} \cdots f_m.$$

Теорема доказывается методом полной математической индукции.

Теорема 2. Если $F(x) = f_1(x) \cdots f_k(x)f_{k+1}(x) \cdots f_m(x)$, $f_i(x) > 0$, $i = 1, 2, \dots, m$, $x \in X$, $k < m$ и $M(x_1, x_2)f_i > 0$ при $i \in [1, k]$, $M(x_1, x_2)f_i < 0$ при $i \in [k+1, m]$, то для выполнения соотношения $M(x_1, x_2)F > 0$ необходимо и достаточно, чтобы

$$M(x_1, x_2)f_1 \cdots f_k > |M(x_1, x_2)f_{k+1} \cdots f_m|. \quad (1)$$

Доказательство необходимости:

$$M(x_1, x_2)F = \frac{f_{k+1}(x_2) \cdots f_m(x_2)}{f_{k+1}(x_1) \cdots f_m(x_1)} \times$$

$$\times (M(x_1, x_2)f_1 \cdots f_k - M(x_1, x_2)f_{k+1} \cdots f_m) > 0,$$

т. е. $M(x_1, x_2)f_1 \cdots f_k > -M(x_1, x_2)f_{k+1} \cdots f_m$, откуда вытекает (1).

Доказательство достаточности: из

$$\frac{f_1(x_2) \cdots f_k(x_2) - f_1(x_1) \cdots f_k(x_1)}{f_1(x_1) \cdots f_k(x_1)} > -$$

$$- \frac{f_{k+1}(x_2) \cdots f_m(x_2) - f_{k+1}(x_1) \cdots f_m(x_1)}{f_{k+1}(x_2) \cdots f_m(x_2)}$$

вытекает, что

$$\frac{f_1(x_2) \cdots f_k(x_2)}{f_1(x_1) \cdots f_k(x_1)} > \frac{f_{k+1}(x_1) \cdots f_m(x_1)}{f_{k+1}(x_2) \cdots f_m(x_2)},$$

т. е. $F(x_1) < F(x_2)$ и $M(x_1, x_2)F > 0$.

Эти две теоремы показывают, что если в качестве обобщенного критерия взять мультипликативную свертку, то она учитывает принцип жертв. Мультипликативная свертка учитывает также принцип порогов. Действительно, при выполнении одного из условий

$$f_i(x) \rightarrow 0, \text{ когда } x \rightarrow x_2, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

выполняется условие $\prod_{i=1}^m f_i(x) \rightarrow 0$, когда $x \rightarrow x_2$, и, следовательно,

переход невозможен. Как показывает применение человеко-машинных методов решения многокритериальных задач, МПР применяет принцип порогов, задавая пороговые значения для каждого критерия в следующей форме:

$$f_i(x) > \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Пусть все критерии однородны и принимают значения из множества $[0, 1]$. Если система (2) совместима, то вместо $\prod_{i=1}^m f_i(x)$ можно рассматривать $\prod_{i=1}^m f_i'(x)$. При этом α_i выбираются так, чтобы выполнялось неравенство $\prod_{i=1}^m f_i'(x) < \prod_{i=1}^m \alpha_i$ для всех $x \in X$, удовлетворяющих хотя бы одному из неравенств $f_i(x) < \alpha_i$, $i = 1, 2, \dots, m$. Для этого достаточно α_i выбрать из условий $f_i'(x) < \prod_{i=1}^m \alpha_i$, как только $f_i(x) < \alpha_i$.

Описанные выше принципы легли в основу при создании специального математического обеспечения автоматизированного формирования исходной базы знаний тренажерных систем объектов химической технологии. Выбор обобщенного критерия с учетом этих принципов позволяет решить задачу получения экспертных оценок при выборе параметров сложных иерархических технологических систем с привлечением опытных специалистов, работающих на разных уровнях управления. Созданная в результате диалоговая система принятия решения обеспечивает оперативное формирование базы знаний, исключая противоречивость и несовместимость информации, получаемой от экспертов разных уровней управления. В частности, при создании базы знаний тренажера операторов производства винилхлорида [4] с учетом особенностей указанного объекта управления получены эффективные решения при наличии множества противоречивых критериев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подиновский Н. В., Подин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач — М.: Наука, 1982. — 256 с.
2. Попов Н. М. Численные алгоритмы многокритериальной оптимизации // Системное программирование и вопросы оптимизации — М.: Изд-во МГУ, 1987 — С. 155—168.
3. Цыпкин Я. Э., Красненкер А. С. Стабильные алгоритмы векторной оптимизации // Э и ММ, — 1978 — № 6. — С. 1181—1186.
4. Создание интеллектуальных информационно-моделирующих обучающих комплексов (тренажеров) для сложных химико-технологических объектов: Сб. науч. тр. под ред. Г. Г. Арунянца — Ереван: Арм НИИНИТН, 1990. — 75 с.

УДК 661.001.57

С. В. АНТОНЯН, Р. Г. АЛМОЯН, А. С. ДАНИЕЛЯН, А. А. АЛМОЯН

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ В ТАРЕЛЬЧАТОЙ КОЛОННЕ

Рассматриваются общие вопросы создания программных модулей для САПР химических производств и представлена разработка модуля расчета процесса ректификации многокомпонентных смесей в тарельчатых колоннах.

Исследуется вопрос решения математической модели рассматриваемого процесса, представляющую собой систему нелинейных уравнений, с применением метода «прогонки». Показано, что применение этого метода обеспечивает устойчивости решений и практических расчетах.

Библиогр.: 3 назв.

Դիտարկվում են ընդհանուկ արտադրություն ավտոմատացված նախագծման համակարգերի համար օրգանական մոդուլների ստեղծման ընդհանուր հարցեր և ներկայացված է ավտոմատացված ռազմարագացրի խառնուրդների մասնախորման ընթացքի հաշվման մշակված մոդուլը «Ալգորիթմ» մեթոդով լուծարարում են զրոարկից գործընթացի ուղիղ ճանապարհների համակարգ ներկայացնող մաթեմատիկական մոդելի լուծման հարցերը: Ցույց է տրվում, որ այս մեթոդի կիրառումը գործնական հաշվարկներում ապահովում է լուծման կայունություն:

Автоматизированное проектирование сложных технологических систем является многостадийным процессом, требующим применения на определенных этапах модулей и методов различного уровня точности, скомпонованных в соответствующие библиотеки математического обеспечения САПР. Целью настоящей работы является разработка программного модуля расчета процесса ректификации многокомпонентной смеси в тарельчатой колонне, основанного на алгоритме, использующем метод «прогонки». Представленный алгоритм и программа позволяют получить стационарное распределение концентраций компонентов смеси по высоте колонны.

Математическая модель процесса ректификации многокомпонентной смеси в тарельчатой колонне имеет вид [1]

$$\begin{cases} -(W + V_0 K_{0,j}) X_{0,j} + L_1 X_{1,j} = 0, & i = 0, \\ V_i + K_i X_{i,j} - (L_i + V_i K_{i,j}) X_{i,j} + L_{i+1} X_{i+1,j} = 0, & i = 1, N, \\ V_N + K_N X_{N,j} - (L_{N+1} + P_{N+1} K_{N+1,j}) X_{N+1,j} = 0, & i = N+1, \end{cases} \quad (1)$$

где $V_i = P + \Phi$, $i = 0, N$; $L_0 = W$; $L_i = \Phi + F$, $i = 1, P$; $L_i = \Phi$, $i = P+1, N+1$; $\Phi_i = 0$, $i = 1, N$; $i \neq P$; $\Phi_P = -FX_{P,j}$; $j = 1, K$; F — количество питания, моль/ч; K — количество компонент в смеси; $X_{P,j}$ — мольная доля j -й компоненты $j = (1, K)$ в смеси; N — ко-

число тарелок в колонне; p — номер тарелки питания; P , F , W — количества дистиллята, орошения и кубового продукта соответственно, моль/ч; V_j , L_j — расходы пара и жидкости, уходящие от j -ой тарелки, моль/ч; X_{ji} , Y_{ji} — мольные концентрации j -ой компоненты на i -ой тарелке в жидкостной и паровой фазе соответственно; K_{ji} — константа фазового равновесия j -ой компоненты на i -ой тарелке.

Математическая модель выведена при следующих допущениях: температура в колонне постоянна и равна средней температуре; расход пара по высоте колонны постоянный; расход жидкости постоянный в пределах секций; уходящий от тарелок пар находится в равновесии с жидкостью; разделяющая способность куба соответствует теоретической тарелке; дефлегматор представляет собой полный конденсатор. Учитывая, что в колонне $T = \text{const}$, для расчета фазового равновесия удобно применение коэффициентов относительной летучести.

Решение системы уравнений (1) представляет собой сложную задачу нахождения $K(N+2)$ переменных при таком же числе уравнений. Однако, данную нелинейную задачу можно привести к итерационному решению соответствующей линейной системы относительно констант фазового равновесия, рассматриваемых на каждом итерационном шаге как постоянные величины. При этом, в начале для определения значений $K_{ji}^{(0)} = \alpha_j \left(\sum_{i=1}^N x_j X_{ji}^{(0)} \right)$, $i = \overline{0, N}$, $j = \overline{1, K}$ необходимо задаться произвольными значениями концентрации $X_{ji}^{(0)}$, например, принять их равными соответствующим концентрациям питания. В этом случае (1) превращается в линейную систему с трехдиагональной матрицей, решая которую, получаем первые приближения значений концентраций X_{ji} , т. е. $X_{ji}^{(1)}$. Поскольку начальные приближения $X_{ji}^{(0)}$ были произвольными, то полученные значения в общем случае не будут удовлетворять условиям

$$\left| \sum_{j=1}^K X_{ji} - 1 \right| < \varepsilon, \quad i = \overline{0, N+1}, \quad (2)$$

т. е. на каждой тарелке сумма концентраций не будет равна единице. На следующем шаге итераций в качестве нового распределения концентраций примем значения $X_{ji}^{(1)}$, предварительно нормировав их для каждой из тарелок по следующему уравнению:

$$X_{ji}^{(2)} = X_{ji}^{(1)} \frac{1}{\sum_{j=1}^K X_{ji}^{(1)}}, \quad i = \overline{0, N+1}, \quad (3)$$

и снова вычислив значения

$$K_{ji}^{(2)} = \alpha_j \sum_{i=1}^N x_j X_{ji}^{(2)}, \quad i = \overline{0, N+1},$$

решим полученную систему линейных уравнений с нахождением значений $X_{ji}^{(3)}$.

Примем следующие обозначения: $a_0 = 0$, $b_0 = W + VK_{0,j}$,
 $a_i = V_i K_{i-1,j}$, $i = \overline{1, N+1}$; $b_i = L_i + VK_{i,j}$, $i = \overline{1, N+1}$; $c_i = L_{i+1}$,
 $i = \overline{0, N+1}$; $j = \overline{1, K}$.

Система уравнений (1) примет вид

$$\begin{aligned} -b_0 X_{0,j} + c_0 X_{1,j} &= -f_0, \quad i = 0, \\ a_i X_{i-1,j} - b_i X_{i,j} + c_i X_{i+1,j} &= -f_i, \quad i = \overline{1, N}, \\ a_{N+1} X_{N,j} - b_{N+1} X_{N+1,j} &= -f_{N+1}, \quad i = N+1, \end{aligned} \quad (4)$$

где $f_i = 0$, $i = \overline{0, N+1}$; $i \neq p$; $f_i = F X_{p,j}$, $i = p$, $j = \overline{1, K}$.

Полученную трехдиагональную систему уравнений целесообразно решать, используя метод прогонки [2, 3]. Это осуществляется в два этапа (прямой и обратный ходы). Алгоритм метода прогонки может быть представлен следующим образом:

а) прямой ход—

$$\begin{aligned} \alpha_{i-1} &= c_i (b_i - a_i \alpha_i), \quad i = \overline{1, N}, \quad \alpha_i = c_0/b_0, \\ \beta_{i+1} &= (f_i + a_i \beta_i)/(b_i - a_i \alpha_i), \quad i = \overline{1, N+1}, \quad \beta_1 = f_0/b_0. \end{aligned} \quad (5)$$

б) обратный ход—

$$X_{i,j} = \alpha_{i+1} X_{i+1,j} + \beta_{i+1}, \quad i = \overline{N, 0}, \quad X_{N+1,j} = \beta_{N+1}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует, что на этапе (а) определяются прогоночные коэффициенты α_i ($i = \overline{2, N}$), β_i ($i = \overline{2, N+1}$), а на этапе (б) — значение неизвестных переменных $X_{i,j}$ ($i = \overline{N, 0}$).

Достаточным условием устойчивости алгоритма прогонки (5)–(6) является диагональное преобладание матрицы коэффициентов системы (4), выражаемой уравнениями

$$|b_0| > 0, \quad |c_0| > 0, \quad |a_{N+1}| > 0, \quad |b_{N+1}| > 0, \quad |a_i| > 0, \quad |c_i| > 0,$$

$$i = \overline{1, N},$$

$$|b_i| > |a_i| + |c_i|, \quad (7)$$

$$|b_0| > |c_0|, \quad |b_{N+1}| > |a_{N+1}|, \quad (8)$$

причем, хотя бы в одном из неравенств (7) или (8) должно выполняться строгое неравенство.

На основе разработанного алгоритма расчета процесса ректификации многокомпонентной смеси в тарельчатой колонне составлена программа на языке Фортран. Работоспособность программы была проверена на примерах расчет процессов ректификации различных многокомпонентных смесей в производствах виниловых мономеров. Анализ результатов расчетов показал, что используемый метод реше-

ния обладает хорошей устойчивостью. Она наблюдалась также в случае отсутствия преобладания диагональных элементов в системе (4). В частности, при тестировании разработанной программы на примере расчета процесса ректификации четырехкомпонентной смеси в колонне с 10 тарелками, в течение всего итерационного процесса в системе (4) преобладание диагональных элементов отсутствовало (матрица коэффициентов для одной из компонент на последней итерации представлена в таблице). Но несмотря на это, процесс решения оказался устойчивым. Отметим, что возможность устойчивых решений в практических расчетах для хорошо обусловленных систем, но с нарушенными условиями диагонального преобладания матрицы коэффициентов системы (4) указывается также в [3].

Таблица
Матрица коэффициентов системы (4)

№ тарелки	A	B	C
0		24,4678	11
1	27,4578	35,5104	14
2	19,5604	31,5695	14
3	17,5895	30,2274	14
4	16,2274	21,1945	10
5	15,1945	28,3432	10
6	14,3132	23,3122	10
7	13,3122	22,5655	10
8	12,5655	21,9613	10
9	11,9643	21,4384	10
10	11,4384	20,9586	10

Разработанный программный модуль может быть рекомендован для включения в библиотеки программ САПР ХТС.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кафаров В. В., Ветохин В. Н., Бояринов А. И. Программирование и вычислительные методы в химии и химической технологии.—М.: Наука, 1972.—486 с.
2. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений.—М.: Наука, 1978.—589 с.
3. Калиткин Н. Н. Численные методы.—М.: Наука, 1978.—512 с.

УДК 621.311.6

А. Ш. АРУТЮНЯН, С. М. КАРАПЕТЯН

СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ДЛЯ ПИТАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА КВАНТОВОГО УСИЛИТЕЛЯ

Описан стабилизированный источник тока для питания сверхпроводящих соленоидов квантовых усилителей со скоростью изменения тока—0,05—1,5 А/с. Коэффициент неустойчивости прибора при токе 19,99 А не более 0,01%, долговременная неустойчивость в режиме «СТОП»—1 мА/ч, КПД при максимальном токе—60%.

Из 1. Библиогр. 2 пат.

Տեղագրված է բիսմութիև ուժեղագրմանը պրոցեսորի ակտիվի մուտքի համար հաղորդակցվող հոսանքի արդյունք 0,05—1,5 Ա/վ արագությամբ հոսանքի փոփոխմանը. ինքնա-
անկայունության դրսևակցող 19,99 Ա հոսանքի դեպքում 0,01 %-ից ավելի չէ. իսկ հրկա-
րամիջյան անկայունությունը 4 Ա/ժ-ը սեփականում է մԱժ է. ՊԷԷ-ի անաղհիպություն հոսանքի
փոփոխում 60 % է:

Опыт работы с квантовыми парамагнитными усилителями (КПУ) при их использовании в радиоэлектронных устройствах выявила необходимость создания малогабаритных источников тока с высокой точностью установки, удержания и индикации тока и возможности дистанционного управления.

Источники тока, использующие известный метод стабилизации и развертки тока с д.б.с. самоиндукции, возникающей из конца соленоида [1], имеют следующие недостатки: они могут применяться только с индуктивными нагрузками; скорость нарастания тока, а также точность удержания зависят от индуктивности нагрузочной обмотки.

В связи с тем, что в КПУ используются электромагниты со сверхпроводящей обмоткой, которые для источника питания представляет индуктивную нагрузку, разработан источник питания на основе стабилизации тока с применением отрицательной обратной связи по току нагрузки [2]. Экспериментальное исследование схемы, применяемой в [2], показали ее потенциальную неустойчивость при индуктивной нагрузке, в связи с чем в предлагаемой схеме предусмотрена специальная корректирующая цепь.

Принципиальная схема разработанного источника тока приведена на рисунке. Она состоит из блока управления (DA1, DA2, DA3, DA4), преобразователя напряжения (DA5, DA6, VT3—VT6) и блока индикации (DD1, HL1—HL4). Источник тока может работать в автоматическом и ручном режимах, устанавливаемых переключателем S4.

В блоке управления, состоящем из интегратора DA2, вырабатывается линейно изменяющееся напряжение, направление и скорость

изменения которого устанавливают с помощью переключателей $S1$, $S2$. С помощью $S1$ переключается направление изменения тока, а также фиксируется его значение в заданном диапазоне изменения тока («СТОП»), а с помощью переключателя $S2$ регулируется скорость изменения тока в пределах от 0,05 до 1,5 А/с. В блоке управления предусмотрена кнопка сброса ($S3$).

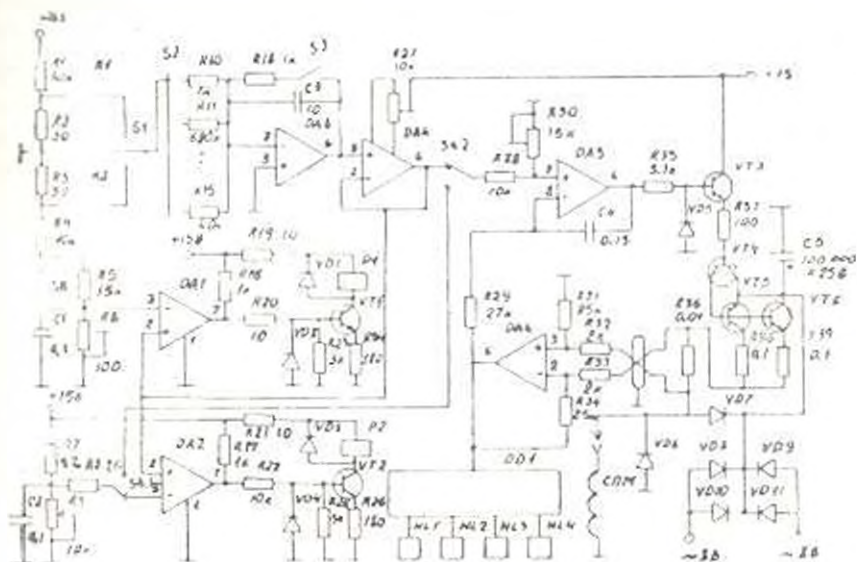


Рис. Принципиальная схема источника тока: $DA1, DA3$ —Э21СА3, $DA2, DA4$ —64У1А, $DA5, DA6$ —4УД5, $DD1$ —572ПВ2, $VT1$ — $VT3$ —2Т3117А, $VT4$ —2Т83В, $VT5, VT6$ —2Т819Б, $VD1$ — $VD5$ —2Д103А, $VD6$ — $VD7$ —2Д20П, $VD8$ — $VD11$ —2Д20, $H1$ — $H4$ —3Д 324Б, $P1, P2$ —ЭС 5А, паспорт серии Р. 569. 6 0—46.

Потенциометром $R9$ устанавливается напряжение, пропорциональное выходному току и ручном режиме работы. Он вместе с элементами $DA3$, $VT2$, $P2$ используется для установки заданного значения тока, при котором осуществляется автоматическая остановка режима линейного нарастания тока («ВПРАВО»). Для того, чтобы управляющее напряжение не перешло в область отрицательных значений в режиме линейного спада («ВЛЕВО»), предусмотрена автоматическая остановка спада тока (элементы $R6$, $DA1$, $VT1$, $P1$) при достижении им нулевого значения.

Напряжение обратной связи, пропорциональное току в обмотке сверхпроводящего магнита (СФМ), выделяется на резисторе $R36$, усиливается посредством $DA6$ и дифференциальном включении и подается на инвертирующий вход усилителя $DA5$. Для устранения генерации в цепи обратной связи включена интегрирующая цепь $R29C4$. Выходной каскад выполнен на транзисторах $VT3$ — $VT6$. Резисторы $R38$, $R39$ выравнивают крутизну параллельно включенных выходных транзисторов, а диоды $VD6$, $VD7$ включены для защиты

выходного каскада. Значение выходного тока (в амперах) посредством АЦП DD1 выводится на светодиодные индикаторы HL1—HL4.

По указанной схеме был разработан стабилизированный источник питания, при помощи которого исследованы основные характеристики квантового усилителя на волне $\lambda = 1,35$ см. Напряжение необходимого магнитного поля для КИУ составляет 0,7—1 Тл, которое достигается пропусканием 7—10 А тока через сверхпроводящую обмотку специального разработанного электромагнита со сверхпроводящей обмоткой.

Максимальное значение выходного тока разработанного источника питания—19,99 А, нестабильность тока при 19,99 А—0,01%, а долговременная нестабильность в режиме «СТОП»—1 мА/ч, КПД при максимальном токе—60%, габаритные размеры прибора—380×420×120 мм, масса 12 кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марапулец В. А., Кулик И. А., Ореский Л. Г. Стабилизированный источник тока для питания сверхпроводящих соленоидов // ПТЭ.—1981.—№ 5.—С. 143—145.
2. Гродненский И. М., Озаян Х. Р., Шемет А. В. Стабилизированный источник тока для питания сверхпроводящих соленоидов // ПТЭ.—1984.—№ 5.—С. 142—143.

ИРФЭ АН АРМЕНИИ

28 VII 1989

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 1, 1991, с. 44—47

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 658.652.3:621.382.33

А. Д. СИМОНЯН, О. Н. БРОТНОВСКИЙ, А. А. ВАРДАНЯН, А. П. ПИРУМЯН

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОМАЗАПАССИВАЦИИ

Предлагается применение технологического процесса стекломезапассивации для защиты от поверхностного пробоя силовых высоковольтных транзисторов взамен применяемого процесса кислотно-струйного профилирования. Приведены данные апробации предлагаемого метода на опытных партиях приборов. Исходя из полученных результатов, показана целесообразность внедрения описанного технологического процесса в производство.

Ил. 3. Библиогр.: 1 назв.

Առաջարկվում է փոխել խոցանակի տեխնոլոգիական դրոճքի մեջ փոխարին անպակայն չերոտի միջնաշերտավորման գործընթացը կիրառելով առաջին անգամից որակադիտարկերը մոնիթորինգային խմբումից պաշտպանելու նպատակով: Ընդհանր ին անալոգիկո մեթոդով փորձնական տրանզիստորներ: Ուսումնասիրման արդյունքները ելնելով առաջարկվող մեթոդի փմնադրված է կիրառվում տեխնոլոգիական դրոճքի մեջ արտադրված սիլիցիոնային կապակապասիվացիոններ:

Развитие силового полупроводникового приборостроения и, в частности, силовых транзисторов характеризуется увеличением комму-

тационной мощности приборов и повышением их быстродействия. С этой точки зрения важным требованием является изготовление полупроводниковых структур на основе пластины монокристаллического кремния с минимальной толщиной, имея при этом максимальные пробивные напряжения коллекторного $p-n$ -перехода. Для получения пробивных напряжений, близких к теоретическим, прежде всего необходимо исключить поверхностный пробой.

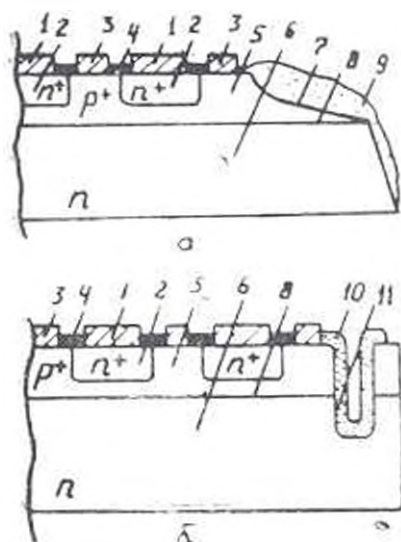


рис. 1 Транзисторные структуры с применением: а) кислотно-струйного травления, б) стекломезапассивации. 1 — металлизация эмиттера, 2 — эмиттер, 3 — металлизация базы, 4 — разделяющая дорожка на Si, 5 — база, 6 — коллектор, 7 — профиль, полученный струйным травлением, 8 — коллекторный $p-n$ -переход, 9 — КЛТ-3), 10 — стекло, 11 — мезоканавка.

В производстве транзисторов серии ТКД 165 и ТКД 152 эта задача решается созданием на месте выхода на поверхность коллекторного $p-n$ -перехода определенного профиля с помощью кислотно-струйного травления с последующей защитой поверхности кремнийорганическим каучуком КЭП-30 [1] (рис. 1 а). Но несмотря на получаемые высокие пробивные напряжения, кислотно-струйное профилирование имеет ряд недостатков, основным из которых является низкая производительность ввиду необходимости поштучной обработки каждой структуры. Кроме того, качество обработки из-за прецизионности технологического процесса во многом зависит от квалификации оператора. Другим недостатком является большая потеря рабочей площади структуры, отведенной под струйное травление, что нежелательно для транзисторных структур диаметром менее 25 мм.

Альтернативным способом защиты от поверхностного пробоя является создание по периферии транзисторной структуры мезоканавки с последующим нанесением на поверхность $p-n$ -перехода слоя стек-

ла (рис. 1 б). Внедрение в производство силовых транзисторов технологического процесса стекломезапассивации позволит снизить себестоимость приборов за счет групповой обработки и снижения расхода остродефицитных дорогостоящих материалов, повысить процент выхода годных приборов.

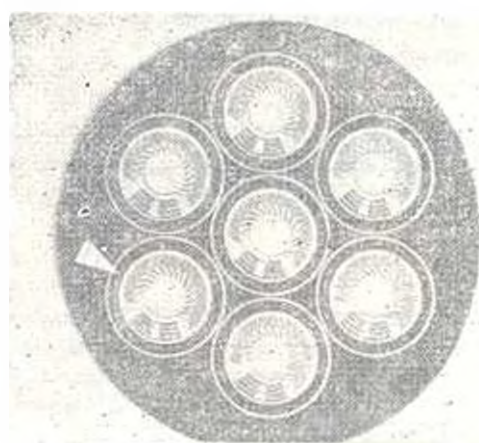


Рис. 2. а) полупроводниковая пластина (стрелкой показана мезаканавка), б) фрагмент мезаканавки с нанесенным слоем стекла (увеличение $\times 500$)

Защитный слой стекла на поверхности мезаструктуры создается оплавлением при температуре 940°C порошкообразного стекломатериала марки С-3ВТ, который предварительно осаждается в мезаканавку методом электрофореза. Метод получения стеклопорошка характеризуется высокой воспроизводимостью и поддается автоматизации. Имеется также возможность изменением пропорций компонентов варьировать такими характеристиками стекла, как температура оплавления, КТР и зарядное состояние. Ввиду малого расхода стекломатериала ($1 \sim 50$ кг на 1 млн структур) его изготовление может быть

налажено непосредственно на предприятии-изготовителе силовых полупроводниковых приборов.

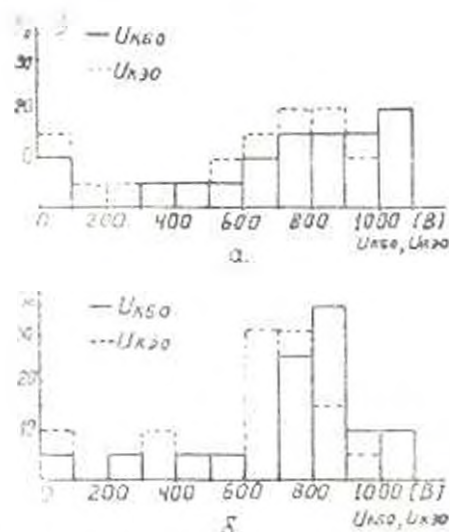


Рис. 3. Гистограммы процентного распределения напряжений U_{K50} и U_{K20} : а) при струйном профилировании; б) при стекломезапасивании.

При внедрении технологического процесса стекломезапасивания в производство силовых транзисторов на предприятиях НИО «Транзистор» были изготовлены опытные партии приборов по описанной технологии. На рис. 2 а и б показаны общий вид полупроводниковой пластины с семью транзисторными структурами и фрагмент мезакалавки с нанесенным слоем стекла. Были проведены измерения обратных вольт-амперных характеристик по параметрам U_{K50} и U_{K20} изготовленных транзисторов при температуре 125°C , на основе которых построены гистограммы (рис. 3 а). Аналогичные гистограммы построены для транзисторов, у которых защита от поверхностного пробоя осуществлялась струйным профилированием (рис. 3 б). Сравнение полученных результатов показывает, что, несмотря на незначительное уменьшение верхнего предела напряжений, процент выхода годных приборов ($U_{K50} > 600 \text{ В}$, $U_{K20} > 700 \text{ В}$) увеличился на 15% .

ЛИТЕРАТУРА

1. Сравнительный анализ различных методов формирования коллекторных переходов силовых транзисторов серии ГКА. Г. Вахнецкий, А. А. Варданян, А. Л. Симонян и др. // Методы и аппаратура исследования и измерения силовых полупроводниковых приборов. — Тбилиси: Вестер, 1987. — С. 123—126.

