

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Журнал издается с 1947 г.
Выходит 6 раз в год на русском языке

Խ Ր Ա Պ Դ Ե Ա Կ Ա Ն Կ Ո Լ Ե Պ Ե Ա

Կասյան Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Աղոց Զ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Ալեքսենսկի Վ. Վ., Անանյան Ա. Կ., Զաղոյան Մ. Ա., Հակոբյան Խ. Ե.,
Սարգսյան Յու. Լ., Ստակյան Մ. Դ., Տեր-Ազարի Ի. Ա.,
Փինտոյան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Պատասխանատու քարտուղար Ստեփանյան Ջ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Касьян М. В. (ответ. редактор), Адоны Г. Т. (зам. ответ. редактора),
Алексеевский В. В., Ананян А. К., Акоюн Р. Е., Задоян М. А.,
Пинаджян В. В. (зам. ответ. редактора), Сиркинян Ю. Л.,
Стакян М. Г., Тер-Азарьев И. А.
Ответственный секретарь Степанян Э. К.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

В. С. ХОМЯКОВ, О. В. ЛАБАГЯН

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ
ШИРОКОУНИВЕРСАЛЬНОГО КОНСОЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО
СТАНКА НА ОСНОВЕ ЛП-ПОИСКА

От конструктивного исполнения несущей системы (НС) широко-универсального консольно-фрезерного станка (ШКФС) в значительной степени зависят такие важные технико-экономические показатели, как точность, жесткость, динамическое качество. Так как амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) станка достаточно полно отражает названные показатели, то оптимизацию его НС можно свести к оптимизации этой характеристики. Ниже задача оптимизации решается методом математического моделирования применительно к ШКФС мод. 6Р82Ш Горьковского завода фрезерных станков (ГЗФС), принятому за базовый вариант.

Основой для построения расчетной схемы НС послужили экспериментальные данные [1]. Записи колебаний рассматривались как стационарные случайные процессы и обрабатывались с использованием методов спектрального анализа. Анализ полученных статистических характеристик позволил в диапазоне от 0 до 200 Гц выделить восемь собственных частот НС станка, которые идентифицированы и сведены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Плюс- кость	Собствен- ная ча- стота, Гц	Характеристика формы колебаний (рис. 1)
1	Y O Z	15	Качательные колебания стойки станка 1.
2		42	Угловые колебания консольной группы 3.
3		65	Изгибные колебания хобота с головкой 6.
4		142	Угловые колебания хобота за счет поворота его в стыке 5 со стойкой станка 1.
5	X O Z	102	Крутильные колебания хобота с серьгами и головкой 6 вокруг своей продольной оси.
6	X O Y	21	Изгибные колебания хобота с головкой 6.
7		50	Угловые колебания консольной группы 3 относительно перпендикулярной оси, близко расположенной к зеркалу станка.
8		200	Угловые колебания хобота за счет поворота его в стыке 5 со стойкой станка 1.

Наибольшее влияние на точность обработки оказывают колебания хобота и консольной группы станка в плоскости YOZ, происходящие в противофазе. Они образуют, так называемые, камертоны формы колебаний НС станка.

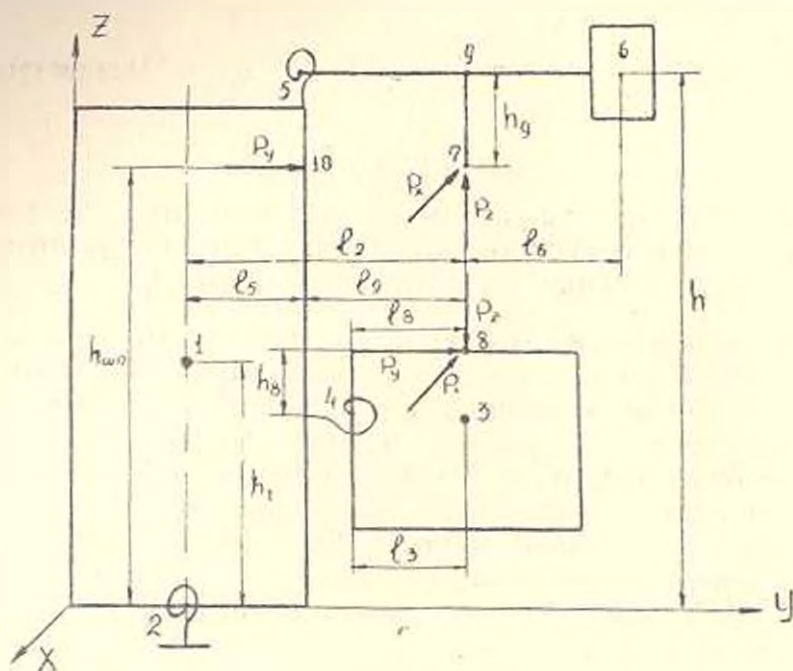


Рис. 1. Расчетная схема станка.

По результатам экспериментального исследования ПКФС разработана пространственная расчетная схема его НС с 8 степенями свободы (рис. 1). На расчетной схеме цифрами обозначены центры тяжести и точки приведения масс стойки станины 1, консольной группы 3 и вертикальной фрезерной головки 6. Хобот представлен в виде упругой балки, левый конец которой упруго связан со стойкой станины 1. Цифрами 2, 4, 5 обозначены упруго-демпфирующие связи между отдельными элементами НС, причем, значения коэффициентов жесткости и демпфирования связи 4 учитывают не только контактную жесткость и демпфирование в направляющих консоли, но и аналогичные параметры системы «основание—ходовой винт—консоль». Цилиндрическая фреза установлена на оправке между двумя сервами, жестко связанными с хоботом станка. Так как податливость на изгиб левой части оправки по сравнению с податливостью хобота велика, принято, что составляющие P_x и P_y силы резания приложены в точке 7 и нагружают хобот через абсолютно жесткую балку 7—9. Составляющая силы резания P_z , действующая вдоль оси 7—10 шпинделя, считалась приложенной к стойке станины в точке 10.

Математической моделью НС станка является система дифференциальных уравнений 16-го порядка с соответствующими краевыми условиями.

В качестве обобщенных координат системы приняты векторы перемещений (рис. 1)

$$q_2 = \varphi_{2x}, \quad q_4 = [\varphi_{4x}, \varphi_{4z}]^T \quad \text{и} \quad q_9 = [x_9, z_9, \varphi_{9x}, \varphi_{9y}, \varphi_{9z}]^T.$$

Математическая модель позволяет найти передаточную функцию НС станка по связи с резанием $W = \Delta/P$, где Δ — изменение относительного расстояния между фрезой и обрабатываемой деталью вследствие колебаний, P — изменение силы фрезерования при колебаниях.

Для определения Δ использовалась формула приведения

$$\Delta = A_{0-2} \cdot q_2 - A_{4-9} \cdot q_4,$$

где A_{0-2} и A_{4-9} — матрицы переноса.

Наибольший интерес с точки зрения влияния на точность обработки представляет составляющая передаточной функции $W_r = \Delta_r/P$. Соответствующая ей АФЧХ НС станка мод. 6Р82Ш показана на рис. 2. Характеристика рассчитана на ЭВМ в диапазоне частот от 0 до 200 Гц при заданных исходных параметрах системы станка. Там же показана соответствующая экспериментальная АФЧХ станка. Использование экспериментальных данных при определении ряда параметров системы позволило добиться того, что отклонения расчетных значений характеристики W_r от экспериментальных не превышают 10% по собственным частотам и 20% по значениям динамической податливости системы на этих частотах.

На характеристике W_r выделяются две резонансные петли (на частотах $f_2 = 42$ Гц и, особенно, $f_3 = 65$ Гц), соответствующие угловым колебаниям консольной группы и изгибным колебаниям хобота с фрезерной головкой в плоскости YOZ. К камертонным формам колебаний относятся также угловые колебания хобота за счет его поворота в стыке 5 со стойкой станины (на частоте $f_7 = 142$ Гц). На АФЧХ НС этой форме колебаний соответствует 7-я петля. Очевидно, что если изменением параметров НС станка удастся уменьшить размеры этих петель, тем самым будет достигнуто улучшение динамического качества станка.

Однако, вследствие связанности системы, при изменении ее параметров претерпевают изменения не только две упомянутые выше, но и другие формы колебаний, а также суммарная статическая податливость станка $K_s(X)$. Поэтому, если в качестве частных критериев оптимизации $F_i(X)$, $i = 1 \dots 3$ выбрать максимальные радиусы-векторы $\max A_j(X)$, $j = 3, 5, 7$ петель АФЧХ НС станка, соответствующих камертонным формам колебаний, то на максимальные радиусы-векторы $\max A_j(X)$, $j = 1, 2, 4, 6, 8$ остальных петель, а также на статическую податливость НС станка $K_s(X)$, следует наложить функциональные ограничения.

Следовательно, задача оптимизации НС станка сводится к определению вектора $X_{\text{опт}}$ оптимальных параметров системы, которые бы минимизировали значения частных критериев $F_i(X)$ в заданном диапа-

зоне частот $f = 0 \dots 200$ Гц при определенных значениях элементов вектора Z постоянных параметров (соответствующих параметрам базового варианта станка мод. 6Р82Ш) и ограничениях: функциональных — $C_k(X) \leq C_{k0}(X)$, $k = 1 \dots 6$ и параметрических — $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$ ($C_k(X)$ и $C_{k0}(X)$ — соответственно, значения $\max A_j(X)$, $j = 1, 2, 4, 6, 8$ и $K_0(X)$ — АФЧХ допустимого и базового вариантов станка, X — вектор варьируемых параметров системы).

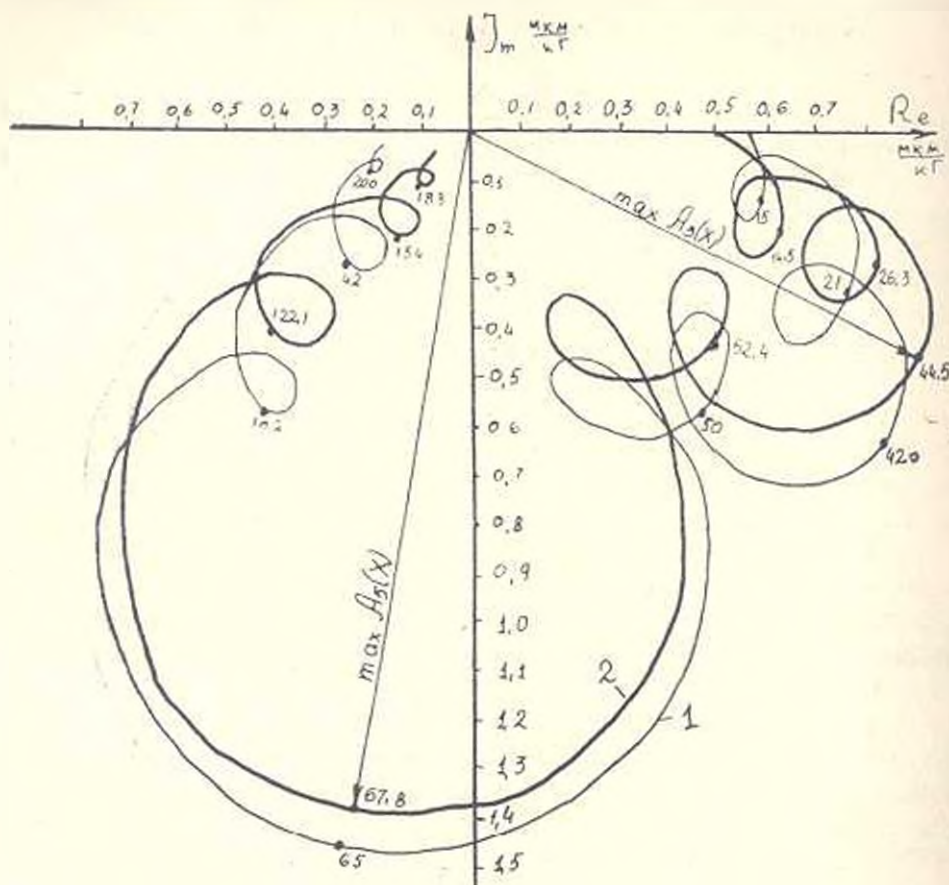


Рис. 2. АФЧХ несущей системы станка: 1 — экспериментальная; 2 — расчетная.

В число варьируемых параметров X включены 10 конструктивных и эксплуатационных параметров консольной группы и хобота, в наибольшей степени влияющих на оптимизируемую камертонную форму колебаний ИС станка (рис. 3):

1) длина L_x и ширина B_x вертикальных направляющих консоли; 2) инерционный параметр $m_x l_x^2$ консольной группы (m_x — приведенная к центру тяжести масса консольной группы, l_x — см. рис. 1); 3) коэффициент k_k контактной податливости направляющих соединения консоль-стойка станины; 4) высота H_x направляющих хобота в соединении со стойкой станины; 5) длины L_x соединения хобота со стойкой

станины: 6) высота h_x , ширина b_x и толщина Δ_x стенки поперечного сечения хобота; 7) коэффициент k_x контактной податливости направляющих соединения хобот-стойка станины.

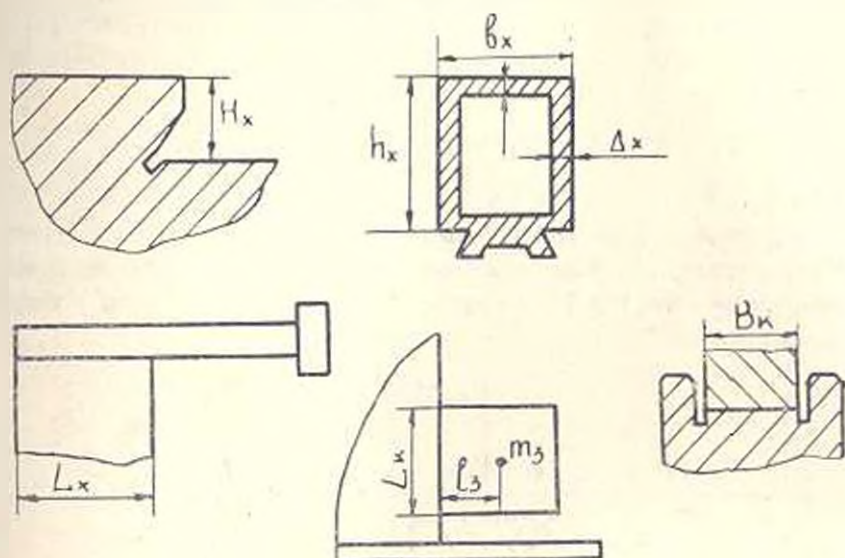


Рис. 3. Варьируемые параметры станка.

Диапазоны варьирования параметров X системы были установлены из конструктивных соображений. Предельные значения параметров X , определяющие допустимую область пространства параметров, приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Параметры X	L_x , см	$m_3 l_3^2$, кг·см ²	B_x , см	$k_x \cdot 10^{-4}$, см ² /кг	H_x , см	L_k , см	$k_x \cdot 10^{-4}$, см ² /кг	h_x , см	b_x , см	Δ_x , см
1	Исходное значение (станок мод. 6P82111)	64	6397,41	10	1,2	3,2	62,5	1	32	28	1,5
2	Минимальное значение	55	3763,2	8	0,7	2,5	50	0,5	30	25	1
3	Максимальное значение	75	8064	12,5	1,4	5	70	1,2	40	35	2,25
4	Вариант 701	71	5376	11	0,9	5	5,7	0,7	39	31	1,5
5	Вариант 510	60	4300,8	8	0,8	3,2	51	0,7	36	27	1,75

Для поиска оптимальных значений X_{opt} варьируемых параметров применен метод ЛП-поиска [2]. Его выбор в данном случае обусловлен отсутствием необходимости единой целевой функции. Метод ЛП-поиска обеспечивает большую равномерность зондирования пространства параметров, повторяемость численных экспериментов, возможность нахождения глобального оптимума.

В процессе решения данной задачи на ЭВМ было просчитано в общей сложности $N = 1024$ вариантов ИС. По результатам расчетов на

ЭВМ сформирована таблица испытаний, фрагмент которой (верхняя часть) показан в табл. 3.

Анализ таблицы испытаний с учетом введенных критериальных и функциональных ограничений показал, что существуют лишь два варианта (510 и 701), для которых удовлетворяются все критериальные ограничения, т. е.

$$\max A_j(X) \leq \max A_{0j}(X), \quad j = 3, 5, 7,$$

где $\max A_{0j}(X)$ — значения частных критериев оптимизации в начальной точке поиска. Еще три варианта (154, 348 и 433) удовлетворяют лишь двум критериальным ограничениям ($j = 3, 5$), в то время как максимальный радиус-вектор 7-й петли АФЧХ у них больше, чем у базового варианта станка.

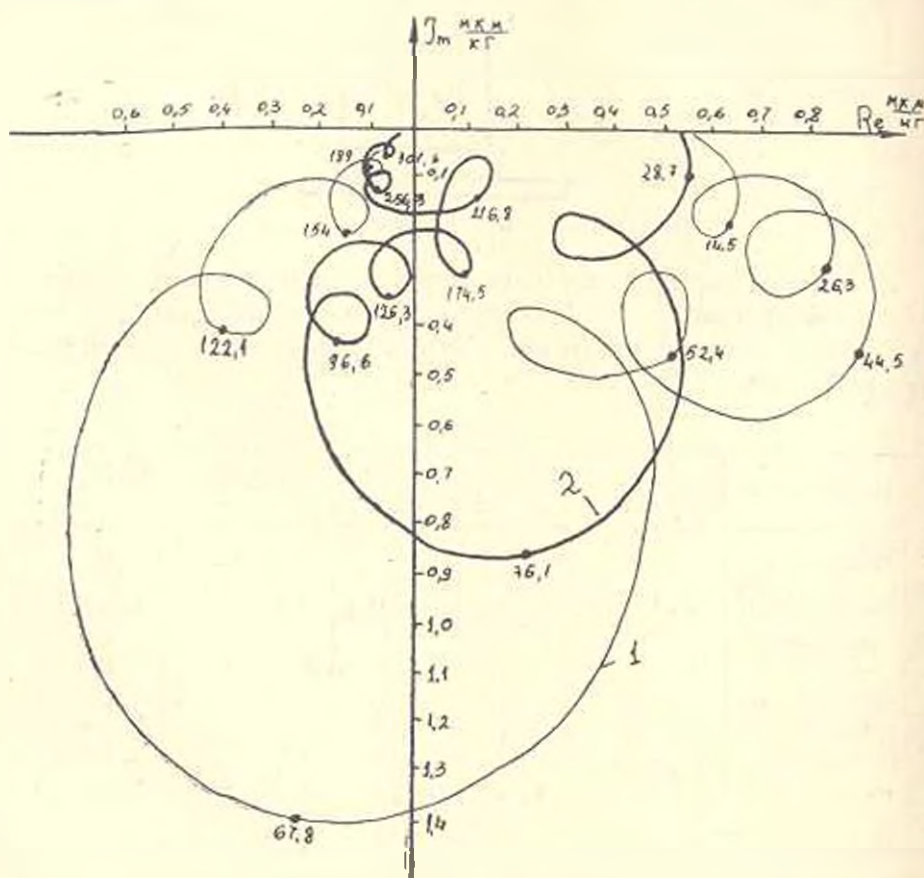


Рис. 4. АФЧХ несущей системы станка после оптимизации по варианту 701: 1 — исходная; 2 — оптимизированная.

По функциональным ограничениям не проходит ни один вариант, но при незначительных уступках — для 701-го варианта по ограничению $\max A_7(X)$ и для 510-го варианта по ограничению $\max A_3(X)$, можно оба эти варианта считать оптимальными. На рис. 4 показана

Таблица 5

$\frac{l}{\max A_2(f_2)}$	$\frac{l}{\max A_3(f_3)}$	$\frac{l}{\max A_7(f_7)}$	$\frac{l}{K_2}$	$\frac{l}{\max A_1(f_1)}$	$\frac{l}{\max A_2(f_2)}$	$\frac{l}{\max A_4(f_4)}$	$\frac{l}{\max A_6(f_6)}$	$\frac{l}{\max A_8(f_8)}$
277 0,446 (36,1)	120 0,31 (108,6)	116 0,152 (237)	433 0,49	240 0,54 (11,6)	896 0,551 (35,4)	114 0,293 (64,6)	701 0,192 (216,8)	701 0,078 (301)
701 0,481 (96,6)	510 0,313 (104,4)	701 0,164 (256,3)	—	701 0,559 (28,7)	510 0,565 (18,5)	119 0,33 (148,1)	471 0,193 (230,1)	510 0,085 (210,8)
883 0,491 (54,5)	701 0,316 (174,5)	471 0,183 (194,1)	0 0,5	471 0,572 (10,7)	591 0,569 (25,6)	701 0,335 (126,3)	—	—
161 0,494 (48,6)	426 0,318 (125,6)	510 0,192 (178,6)	—	—	—	131 0,342 (154,2)	964 0,197 (179,9)	—
—	—	970 0,209 (190,2)	—	193 0,637 (21)	—	—	510 0,201 (139,4)	—
364 0,537 (45,3)	—	—	701 0,54	510 0,643 (8,3)	—	0 0,676 (52,4)	309 0,218 (194,2)	113 0,13 (348,1)
510 0,538 (73,8)	154 0,406 (131,5)	—	154 0,54	236 0,649 (17,5)	—	—	—	—
259 0,539 (48,6)	—	—	—	—	999 0,863 (30,1)	—	154 0,51 (174,2)	193 0,136 (267,3)
—	—	—	510 0,62	—	0 0,882 (26,3)	—	—	—
0 1,033 (44,5)	0 1,422 (67,8)	0 0,28 (154,1)	348 0,67	0 0,671 (14,5)	701 0,89 (76,1)	510 0,834 (87,9)	0 0,556 (121,5)	0 0,159 (189)

— номер испытания, $\max A_i$ [мм, кг], f_i — собственная частота колебаний [Гц].

АФЧХ варианта 701. Налицо значительное уменьшение петель, соответствующих камертонным формам колебаний. Одновременно увеличивались собственные частоты этих форм колебаний. Полученные в результате оптимизации характеристики (табл. 3) не только уменьшились в размерах, но и сместились вправо, что также свидетельствует об улучшении динамических свойств станка.

Проведенное исследование показывает не только возможность применения метода ЛП-поиска для оптимизации конструкции несущих систем станков, но и свидетельствует о резервах повышения жесткости и динамического качества ШКФС, выпускаемых ГЗФС.

МОССТАНКИН

5. VII. 1982

Վ. Ս. ԿՈՄԻՅԱՆՈՎ, Է. Վ. ԳՈՐԱՂՅԱՆ

ԼԱՅՆ ԲԻՆՈՎԵՐՍԱԿ ԿՈՆՍՈԼ-ՖՐԵԶԵՐԱՅԻՆ ՀԱՍՏՈՑԻ ԿՐՈՂ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԱՅԻՆ ՕՊՏԻՄԱԿԱՑՈՒՄԸ «ԼՊ-ՍՈՒՍԿ» ԵՂԱՆԱԿՈՎ

Ա մ փ ո փ ու մ

Փորձնական տվյալների հիման վրա ցույց է տրված 6P8211I հաստցի հաշվարկային սխեմայի ընտրության, տատանումների ձևերի (բնույթի) վերլուծության և մաթեմատիկական մոդելի կառուցման կարգը:

Դա հնարավորություն է տվել կատարել հաստցի կոնստրուկցիայի օպտիմալացում «ԼՊ-ՍՈՒՍԿ» եղանակով: Ծույց է տրված այդ եղանակի կիրառման հնարավորությունը հաստցիների կրող համակարգերի կոնստրուկցիաների օպտիմալացման համար:

Կոնստրուկտիվ պարամետրերի բերված փաստացի թվական արժեքները, որոնք ստացվել են օպտիմալացման հետևանքով, թույլ են տալիս պայմանական բարելավել հաստցի դինամիկական հատկությունները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Дибегян О. В., Хомяков В. С. Экспериментальное исследование колебаний широко-универсального консольно-фрезерного станка.— Изв. АН АрмССР (сер. ТII), т. XXXV, № 1, 1982, с. 37—40.
2. Артоболовский И. И. и др. Постановка и решение задач оптимального проектирования машин — Машиноведение, 1977, № 5, с. 15—23.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

В. М. ТАИРЯН

К ИССЛЕДОВАНИЮ КРУГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Согласно основной теореме кругового преобразования конформной плоскости [1], всякое круговое преобразование K есть или подобие P , или инверсия I , или может быть представлено в виде произведения подобия на инверсию. Математически круговое преобразование может быть представлено в одной из трех форм: $K = P$; $K = I$; $K = PI$.

В теории механизмов устройства, осуществляющие преобразования, при котором любые четыре точки, лежащие на окружности, переходят в четыре точки, также лежащие на одной окружности, известны под названием пантографов и инверсоров. Пантографы осуществляют преобразование $K = P$, а остальные две формы преобразования осуществляются с помощью инверсоров. Преобразование по форме $K = I$ осуществляются обобщенным инверсором Поселье-Липкина, а по форме $K = PI$ — инверсором Сильвестера-Кемпе. Все разновидности инверсоров с поступательными парами, кроме инверсора Крауфорда и его модификаций, могут быть получены из вышеуказанных инверсоров методом, предложенным в [2]. Путем же сдвигания инверсоров с поступательными парами получают другие известные схемы (инверсор Перролаца и др.).

Изучение вопроса показывает, что в основу создания каждой кинематической схемы кругового преобразования была заложена та или иная частная геометрическая закономерность, а не геометрическая теория преобразований. Поэтому устройства, осуществляющие подобное преобразование и инверсию, создавались, хотя порою при участии одного и того же изобретателя, но вне связи друг с другом.

В настоящее время, когда эти преобразователи в отдельности достаточно изучены, целесообразно их комплексное исследование. Это позволит выявить новые схемы, а также возможности указанных механизмов, и ответить на ряд вопросов, касающихся их геометрии.

1. Рассмотрим кинематическую цепь с поступательными парами, изображенную на рис. 1, для которой выполняется необходимое для существования круговых преобразователей условие

$$k = r_1/r_2 = l_1/l_2 = e_1/e_2. \quad (1)$$

При обеспечении условия (1), фигуры OAB (OAB') и OCD (OCD') в любом положении подобны и повернуты относительно друг друга на

постоянный угол θ . Расстояния точек B (B') и D (D') от точки O (модули радиус-векторов ρ) определяются как удаления центров ползунов от центра вращения кривошипа кривошипно-ползунных механизмов, образуемых при закреплении направляющего звена 6:

$$\rho_{B, B'} = \sqrt{e_1^2 + S_{B, B'}^2}; \quad \rho_{D, D'} = \sqrt{e_2^2 + S_{D, D'}^2}, \quad (2)$$

где

$$S_{B, B'} = r_1 [\cos \varphi \pm \sqrt{\lambda^2 - (\mu - \sin \varphi)^2}];$$

$$S_{D, D'} = r_2 [\cos \varphi \pm \sqrt{\lambda^2 - (\mu - \sin \varphi)^2}];$$

$$\lambda = l_1/r_1 = l_2/r_2; \quad \mu = e_1/r_1 = e_2/r_2.$$

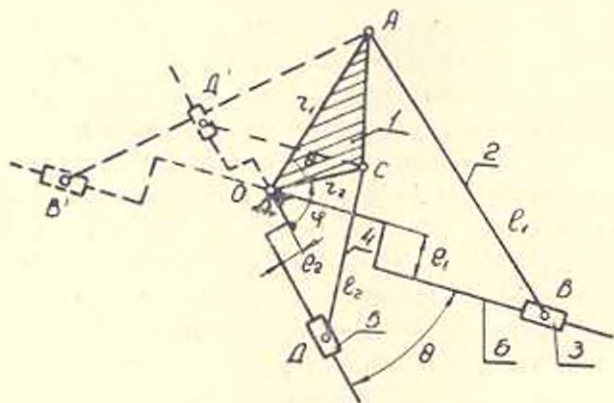


Рис. 1.

Если механизм собран так, что в выражениях для S радикалы берутся с одинаковым знаком, то имеем пантографную схему, в противном случае — инверсорную.

Из (2) при пантографной схеме следует, что

$$\rho_B/\rho_D = \rho_{B'}/\rho_{D'} = r_1/r_2 = k = \text{const.} \quad (3)$$

На основе условия (3) с учетом (2) можно утверждать, что пантографы могут быть с коленным направляющим звеном 6, а также с переменнo-пропорциональными длинами звеньев r_1 , r_2 и l_1 , l_2 . В частности, пантографы с переменнo-пропорциональными параметрами $r_1 = r_1(\varphi)$ и $r_2 = r_2(\varphi)$ представлены на рис. 2. Пропорциональность переменных радиусов $r_1 = O_2A$ и $r_2 = O_2A'$ (рис. 2а) осуществляется с помощью параллелограмма O_1ACO_2 , построенного относительно центра подобного преобразования O_2 по законам построения обобщенного пантографа. На рис. 2б, при условии $e = 0$, построен аналогичный пантограф для значений $\theta = 0$ и $\theta = \pi$, который отличается от общезвестных схем. Напомним, что в известных схемах пантографов и инверсоров [2—5] опорные шарниры собраны в одну точку, совпадающую с центром подобия (или инверсии), т. е. имеют стойку нулевой длины.

Из выражений (2), при инверсорной схеме (рис. 1) имеем:

$$\rho_B \cdot \rho_{D'} = \rho_{B'} \cdot \rho_D = r_1 \cdot r_2 \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4\mu[\mu + (\lambda^2 - 1) \sin \varphi]} \neq \text{const.} \quad (4)$$

На основе полученного условия (4) можно утверждать, что инверсоры с коленным звеном вообще существовать не могут. При $e=0$ ($\mu=0$) выражение (4) принимает вид

$$\rho_B \cdot \rho_{D'} = \rho_{B'} \cdot \rho_D = r_1 \cdot r_2 (1 - \lambda^2). \quad (5)$$

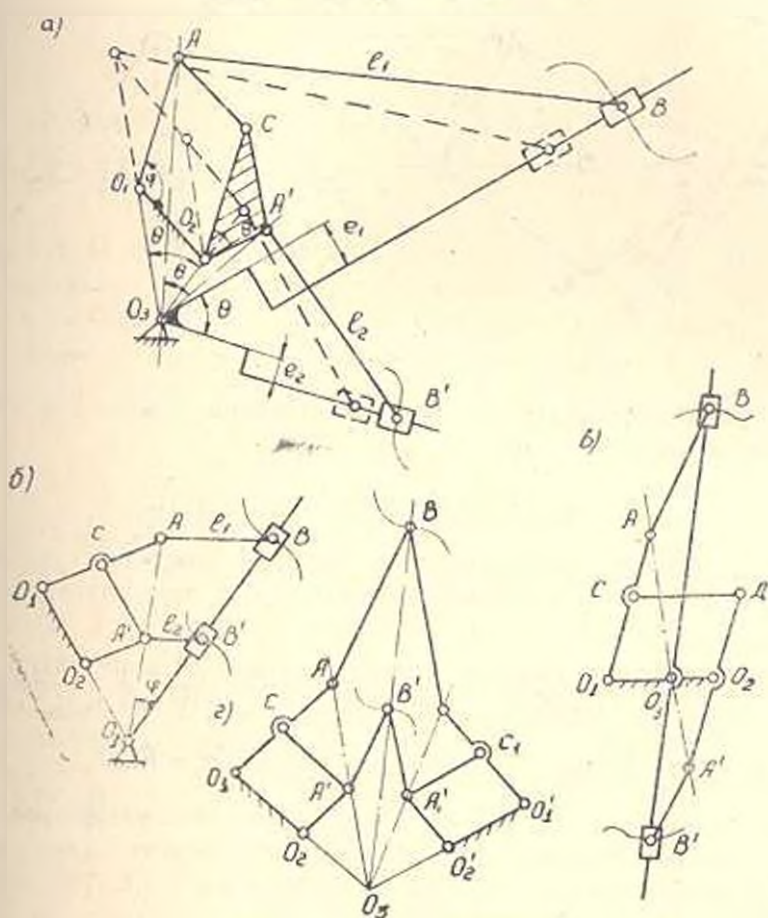


Рис. 2.

При соблюдении условия (1) произведение $r_1 r_2 (1 - \lambda^2)$ остается постоянным лишь при постоянных значениях r_1 , r_2 и λ , следовательно, существование инверсоров с пропорционально-переменными параметрами также невозможно и поэтому не встречаются инверсоры со стойкой ненулевой измерения.

С учетом (1) выражение (5) окончательно представим в виде:

$$\rho_B \cdot \rho_{D'} = \rho_{B'} \cdot \rho_D = k r_2^2 (1 - \lambda^2) = k (r_2^2 - l_2^2) = (r_1^2 - l_1^2)/k. \quad (6)$$

Сравнивая структурно тождественные схемы пантиграфов и инверсоров, можно утверждать, что схемы пантиграфов имеют более «сво-

бодную» геометрию, т. е. на их кинематические схемы, кроме основного условия (1), не накладываются другие геометрические ограничения.

2. Из теории круговых преобразований [1] известно, что произведение двух инверсий с коэффициентами i_1 , i_2 и с одним и тем же центром O есть гомотетия с центром O и коэффициентом $k_j = i_1/i_2$. При этом, если инверсии одного и того же знака, получаем положительную гомотетию, в противном случае — отрицательную.

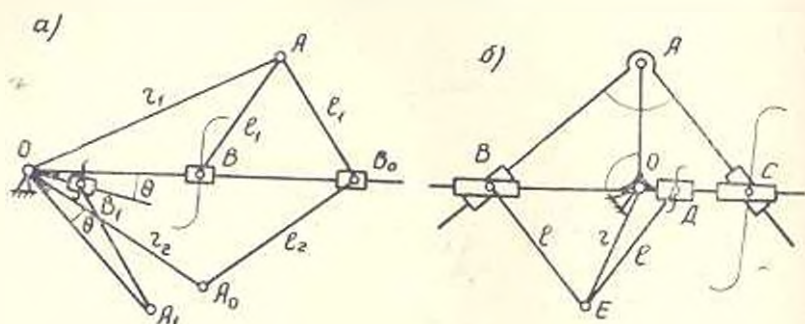


Рис. 3.

На рис. 3а представлена схема механизма, с помощью которого осуществляется преобразование

$$k = J_1 \cdot J_2 \cdot \gamma_2 \cdot \omega = \gamma_j \cdot \gamma_1 \cdot \omega = \gamma \cdot \omega = \Pi, \quad (7)$$

где Π — подобное преобразование; J_1 и J_2 — инверсии с центром в точке O ; γ_2 и ω — соответственно, гомотетия и поворот относительно центра инверсии, а $\gamma = \gamma_2 \cdot \gamma_1$.

Коэффициент подобного преобразования k определяется как произведение двух коэффициентов k_1 и k_j гомотетий γ_1 и $\gamma_j = J_1 \cdot J_2$:

$$k = k_1 \cdot k_j = k_1 \cdot l_j/l_1 = k_1 (r_1^2 - l_1^2)/(r_2^2 - l_2^2). \quad (8)$$

Как видно из (8), при помощи сдвигания двух инверсоров можно осуществить при сравнительно небольших отношениях длин звеньев подобное преобразование с большим коэффициентом k . Так, к примеру, при относительных размерах звеньев: $r_1 = OA = 2$; $l_1 = AB = AB_0 = 1$; $r_2 = OA_0 = 1,5$; $l_2 = A_0B_0 = 1,457$; $OA_1 = 0,75$ и $A_1B_1 = 0,728$ имеем $k \approx 48$ ($k_1 = 2$, $l_1 = 3$, $i_2 \approx 0,125$).

Схемы пантиграфов, осуществляющие подобное преобразование с большим k , можно создать также на основе инверсоров Гарта, Поселье-Липкина, механизма Крауфорда и его модификаций. На рис. 3б представлен пантиграф на основе инверсора Крауфорда, для которого коэффициент подобного преобразования $k = -k_1 a^2/(r^2 - l^2)$. В этом случае, при $r > l$ имеем отрицательную гомотетию, а при $r < l$ — положительную.

На основе проведенного комплексного исследования пантиграфов и инверсоров можно сделать следующие выводы.

1. Пантографы и инверсоры составляют единую группу круговых преобразователей, определяемую их структурой.

2. Подгруппы подобных преобразователей и инверсоров в группе круговых преобразователей определяются лишь условием сборки механизма и его геометрией.

ЕрIII им К. Маркса

18 V. 1981

Վ. Մ. ՔԱՆԴԱՆ

ԵՐԶԱՆԱՅԻՆ ՓՈԽԱԿԵՐԱՊԻԶՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ՎԵՐԱՆԵՐՅԱԼ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Երջանային փոխակերպումների տեսության հիման վրա կատարվում է պատասխանների և ինվերսորների կոմպլեքսային հետազոտում, որը թույլ է տալիս ի հայտ բերել շրջանային փոխակերպիչների նոր սխեմաներ և պարզաբանել նրանց երկրաչափության հետ առնչվող հարցերը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Моденов П. С., Парходенко А. С. Геометрические преобразования.— М.: изд. МГУ, 1961, с. 218—228.
2. Артоболевский И. И. Теория механизмов для воспроизведения плоских кривых.— М.: изд. АН СССР, 1959, с. 22—38.
3. Рузмин Л. Д. Проектирование механизмов точными методами.— Л.: Машиностроение, 1972, с. 12—30.
4. Шамбиров В. А. Новый метод синтеза пантографов и других трансформирующих механизмов.— В кн.: Тр. вост. Машиноведения. М., т. 17, вып. 67, 1957, с. 5—21.
5. Дибксман. Строгое соответствие между новыми и старыми инверсорами.— Тр. Амер. общ. вост.-мех. Конструирование и технология машиностроения, 1971, № 1, с. 176—181.

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

М. В. ОГАНЕСЯН, А. Е. САРГСЯН

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ
ПЛОСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Опыт последствий землетрясений показывает, что на величину интенсивности сейсмического воздействия на свободной поверхности Земли существенное влияние оказывает геометрическое строение основания [1—3]. Для этого важно оценить влияние наклонного слоя, лежащего на поверхности однородных скальных пород, на интенсивность сейсмического воздействия [4].

Рассмотрим методику определения сейсмического воздействия на поверхности слоя переменной толщины, лежащей на скальных породах, когда плоские сейсмические волны, произвольным законом изменяющиеся по времени (типа SH) и распространяющиеся в скальных породах, под произвольным углом α_{21} падают на нижнюю границу слоя (рис. 1). Определим закон колебания произвольной точки $A_0(x_1, 0)$.

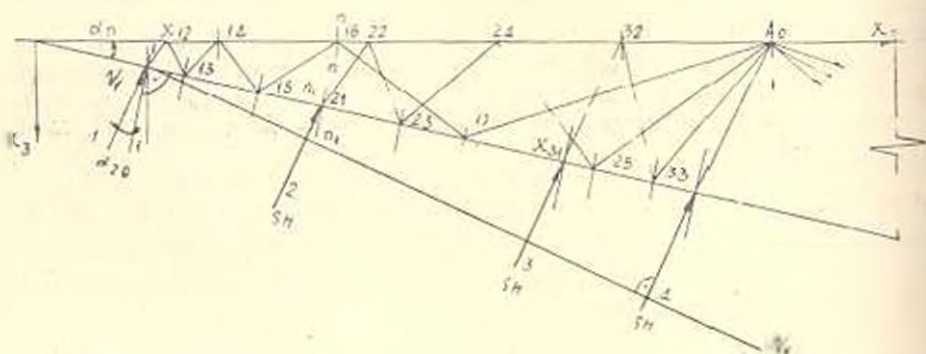


Рис. 1. Лучевая схема распространения волн типа SH в слое переменной толщины.

Волновая сетка, образующаяся внутри слоя, показана на рис. 1. Волна SH , проникающая в слой, распространяется вдоль него и после довательного отражается от подошвы $x_2 = x_1 \tan \alpha_{21}$ и кровли $x_2 = 0$ слоя. При этом, в отличие от слоя, имеющего постоянную толщину, угол отражения от толщины $x_2 = x_1 \tan \alpha_{21}$ или $x_2 = 0$ меняется по закону:

$$\alpha_{2k} = \alpha_{21} + (k - 1) \alpha_{21} \quad (k = 1, 2, 3, 4, \dots), \quad (1)$$

где k_1 , ($v = k - 1$) — количества шагов и последовательного отражения волны, распространяющейся внутри слоя; α_{21} — угол преломления волны, распространяющейся в полупространстве и падающей на границу $x_2 = x_1 \operatorname{tg} \alpha_n$.

Угол отражения при $k=2, 4, 6, \dots$ относится к границе $x_2 = x_1 \operatorname{tg} \alpha_n$, а при $k=1, 3, 5, 7, \dots$ — $x_2 = 0$.

При определенных значениях угла α_{2k} ($k=2, 3, 4, \dots$)

$$\alpha_{2k} \geq \frac{\pi}{2} - \alpha_n \quad (2)$$

волна распространяется внутри слоя без последующего отражения от его границ. Подставляя (1) в (2), получим:

$$k \geq \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_n \right) \frac{1}{\alpha_n} \quad (3)$$

Из (3) можно сделать вывод, что волны распространяются в слое без последовательного отражения только в том случае, когда $\alpha_n = \frac{\pi}{2}$, т. е. направление распространения первичных волн параллельно границе раздела $x_2 = x_1 \operatorname{tg} \alpha_n$. В случае слоя постоянной толщины ($\alpha_n = 0$) количество последовательного отражения волны внутри идеального упругого слоя равно бесконечности.

В (1), (3) значение α_{21} определяется из условия Снеллиуса:

$$\sin \alpha_{21} = \frac{a_{21}}{a_{20}} \sin \alpha_{20} \quad (4)$$

Для определения сдвига фазы по времени различных волн, падающих в точку A_0 , вводим следующие обозначения:

L_i — длина траектории волны внутри слоя i -ого луча волны, падающего из полупространства на нижнюю границу слоя $x_2 = x_1 \operatorname{tg} \alpha_n$;

L_{ik} — длина k -ого прямолинейного отрезка (k -ого шага), входящего в траекторию волны внутри слоя от i -ого луча;

P — максимально возможное количество шагов в траектории волны, которая, распространяясь внутри слоя, падает в произвольную точку $A_0(x_1; 0)$, определенную из (3) при $n = k$.

Из геометрической схемы волновой сетки (рис. 1) L_{ik} принимает следующие значения:

$$\begin{aligned} L_{ik} &= \frac{x_1 \sin \alpha_n}{\cos [\alpha_{21} + 2(i-1)\alpha_n]} \quad (k = k_i); \\ L_{ik} &= \frac{L_{i, k+1} \cos \alpha_{2, k+2}}{\cos \alpha_{2k}} \quad (k = k_i - 1; k_i = 2, \dots, 1), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 \text{где при} \quad i=1, \quad k=1, 2, \dots, n=k_1; \\
 i=2, \quad k=1, 2, \dots, n-2=k_2; \\
 i=3, \quad k=1, 2, \dots, n-4=k_3; \\
 i=4, \quad k=1, 2, \dots, n-6=k_4 \text{ и т. д.}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Обобщая выражение (6), можно записать, что $k_i = n - 2(i - 1)$, а значение L_i определить:

$$L_i = \sum_k^{n-2(i-1)} L_{ik} = \sum_k^{k_i} L_{ik}. \tag{7}$$

Следовательно, время распространения волны внутри слоя от i -ого луча будет

$$\Delta t'_i = \frac{L_i}{a_{21}}. \tag{8}$$

Для определения сдвига фазы в полупространстве по времени $\Delta t''$ введем следующие дополнительные обозначения:

$$l_i = x_{1A} - x_{i1}; \quad a_{21} + \gamma a_n \geq \frac{\pi}{2} - a_n; \quad \gamma = \left(\frac{\pi}{2} - a_{21} \right) \frac{1}{a_n} - 1, \tag{9}$$

где x_{1A} — координата точки A_0 по оси x_1 ; x_{i1} — координаты начальной точки волны, распространяющейся внутри слоя (11 для $i=1$, 21 для $i=2$ и т. д. — рис. 1).

Тогда:

$$\begin{aligned}
 l_i = L_{ik_i} \sin a_{2(k_i+1)} + \sum_{k=2}^{k_i-1} (L_{ik} + L_{i,k-1}) \sin a_{2k} \\
 (k=2, 4, 6 \dots)
 \end{aligned} \tag{10}$$

и, следовательно,

$$\Delta t''_i = \frac{l_i - l_1}{a_{20}} \operatorname{tg} a_n. \tag{11}$$

Суммируя $\Delta t'_i$ и $\Delta t''_i$, получим время прохождения волны вдоль i -ого луча от фронта волны $N_1 N_i$ до точки A_0 :

$$\Delta t_i = \Delta t'_i + \Delta t''_i = \frac{L_i}{a_{21}} + \frac{l_i - l_1}{a_{20}} \operatorname{tg} a_n. \tag{12}$$

Условие интерференционного колебания в случае наклонного слоя запишется в виде:

$$\Delta t_i = n \frac{T}{2},$$

где при $n = 1, 3, 5, \dots$ относится к условию минимума, а $n = 0, 2, 4, \dots$ — максимума.

Запишем выражения, определяющие значения коэффициентов отражения волны вдоль i -ого луча при k -ом отражении от верхней и нижней границы слоя:

от верхней границы — $k_{ik} = 1$, при $k = 1, 3, \dots, k_1$,

от нижней границы —

$$k_{ik} = \frac{2a_{20} \rho_0 \cos \alpha_{2(k+1)}}{\rho_0 a_{20} \cos \alpha_{2(k+1)} - \rho_1 a_{21} \cos \alpha_{2(k+1)}} \quad (k = 2, 4, 6). \quad (13)$$

Смещение в точке A_0 от i -ого луча плоской гармонической волны

$$U_{20}^i = B_0 e^{jk_1} \left[t - \frac{x_1 \sin(\alpha_{20} + \alpha_n) - x_2 \cos(\alpha_{20} + \alpha_n)}{a_{21}} \right],$$

падающей на нижнюю границу $x_2 = x_1 \operatorname{tg} \alpha_n$, будет:

$$\begin{aligned} U_{21}^i(x_1; 0; t) &= k_0 k_{21} k_{22} \dots k_{ik_1} B_0 e^{jk_1} \left[t - \Delta t_i - \frac{x_1 \sin \alpha_{2(k_1+1)}}{a_{21}} \right] = \\ &= k_0 \sum_{k=1}^{k_1} k_{ik} B_1 e^{jk_1} \left[t - \Delta t_i - \frac{x_1 \sin \alpha_{2(k_1+1)}}{a_{21}} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Проводя суммирование выражения (14) по i , получим формулу, определяющую общее смещение в точке $A_0(x_1; 0)$:

$$U_{21}(x_1; 0; t) = k_0 B_1 \sum_{i=1}^n \left[\prod_{k=1}^{k_1} k_{ik} \right] e^{jk_1} \left[t - \Delta t_i - \frac{x_1 \sin \alpha_{2(k_1+1)}}{a_{21}} \right].$$

Для нестационарной сейсмической волны по времени

$$U_{20} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{20}(x_1; x_2; k_4) e^{jk_1} \left[t - \frac{x_1 \sin(\alpha_{20} + \alpha_n) - x_2 \cos(\alpha_{20} + \alpha_n)}{a_{20}} \right] dk_4$$

имеем:

$$U_{21}(x_1; 0; t) = k_0 \sum_{i=1}^n \left[\prod_{k=1}^{k_1} k_{ik} \right] \int_{-\infty}^{\infty} S_{20}(x_1; 0; k_4) e^{jk_1} \left[t - \Delta t_i - \frac{x_1 \sin \alpha_{2(k_1+1)}}{a_{21}} \right] dk_4,$$

где $S_{20}(x_1; 0; k_4)$ — спектральная функция падающей волны на нижнюю границу слоя.

Как показывает выражение (11) или (12), интенсивность сейсмического воздействия на слой переменной толщины существенно зависит от пространственной координаты x_1 . В этом случае условие максимума и минимума следует проводить и по координате x_1 .

Из (5) и (11) следует, что и случае переменной толщины сдвиг фазы Δt_i является функцией от координаты x_1 . При остальных одинаковых

случаях, на поверхности слоя переменной толщины резонансные явления зависят от координаты x_1 .

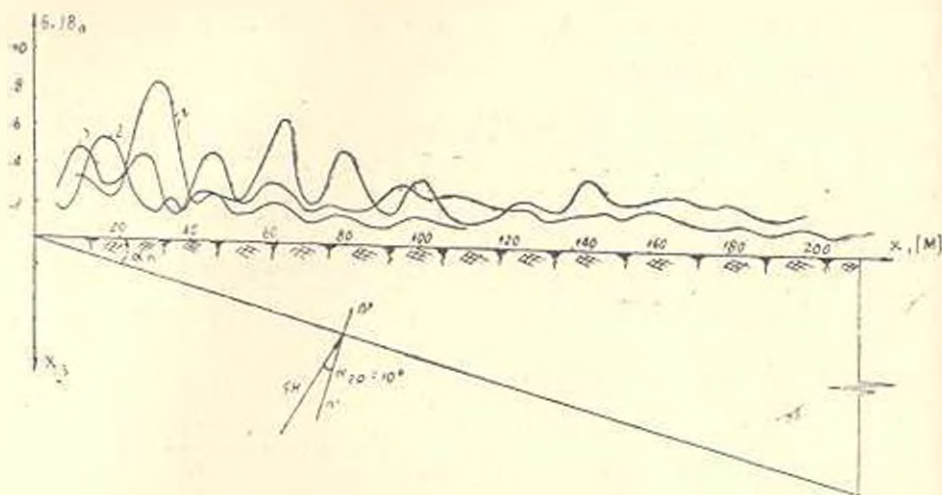


Рис. 2. Резонансные кривые (B_1/B_0) по координате x_1 при различных углах наклона на нижнюю границу слоя α_n .

На рис. 2 показан характерный график изменения значений резонансных кривых (B_1/B_0) , B_1 — амплитуда колебания грунта на поверхности $x_2 = 0$ по координате x_1 , когда на нижнюю границу слоя падает гармоническая волна с единичной амплитудой $B_0 = 1$, при различных углах наклона на нижнюю границу слоя $\alpha_n = 10^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ и следующих фиксированных данных:

$$\rho_0 = 1,9 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{см}^3; \quad a_{20} = 6 \cdot 10^1 \text{ см/с}; \quad \rho_1 = 0,8 \rho_0; \quad a_{21} = 0,25 a_{20}; \\ \chi_{20} = 0,04; \quad \chi_{21} = 2 \chi_{20}; \quad \alpha_n = 30^\circ; \quad k_4 = 3,14 \text{ с}^{-1}.$$

ИГИС АН Арм.ССР,
ИГИС Гидропроект им. С. Я. Жука

27. XI. 1981

Մ. Վ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Է. Ե. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ ՀԱՍՏՈՒԹՅԱՄԲ ՇԵՐՏԻ ԱԶԳԻՑՈՒԹՅՈՒՆԸ
ՏԱՐԱԽՎՈՂ ՀԱՐԹ ՍԵՅՍՄԵՐԱԿԱՆ ԱՐԺԻ ԻՆՏԵՆՍԻՎՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Ա մ փ ո փ ու մ

Դիտարկվում են կամայական սնկյան տակ բնկնող ՏՄ տիպի հարթ սեյսմիկական ալիքի տարածումը փոփոխական հաստությամբ շերտում և ալիքի պարամետրերի որոշումը ազատ մակերևույթի ցանկացած կետում:

Խնդրի լուծումը կատարվում է հառադայթային մեթոդով, որի օգնությամբ բացահայտված է ալիքային պատկերի շերտում: Որոշված է երկու հարևան ալիքների ֆազերի տարբերությունը տարածման ընթացքում մինչև

ազատ մակերևույթ: Լկացուցված է, որ սեյսմիկական ազդեցության ինտեն-
սիտետները և անդի ունեցող սեղողանոսային երևույթները փոփոխական շեր-
տի վրա էապես կախված են տարածական X կոորդինատից: Լուծման ընթաց-
քում հաշվի է առնված ալիքի տարածման ժամանակ ինտերֆերենցիայի երե-
վույթները:

Բերված է թվային օրինակ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кац А. Э. Сейсмическое микрорайонирование с учетом изменения параметров ко-
лебаний и направлений с глубиной.— В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии.
М., Наука, вып. 13, 1970, с. 16—31.
2. Саворенский Е. Ф. Сейсмические волны.— М.: Недра, 1972.— 291 с.
3. Штейнберг В. В. Влияние слоя на амплитудно-частотный спектр колебаний на по-
верхности.— В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии, М., Наука, вып. 10, 1965,
с. 34—46.
4. Саргсян А. Е. Сейсмические воздействия на свободную поверхность строительной
площадки и на преграду, лежащую на многослонном основании.— В кн.: Тези-
сы докладов Всесоюзного научно-технического совещания МИРСС-81, Л., 1981,
с. 102—104.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Е. С. МАНУКЯН, В. Б. НЕРСЕСЯН

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ
ЩЕЛЕВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ

В измерительных системах, предназначенных для измерения геометрических размеров в металлургической промышленности, широкое применение нашли толщиномеры, основанные на различных физических принципах. Среди них наиболее эффективными являются вихретоковые преобразователи трансформаторного типа (ВТП) [1]. Однако известные ВТП по принципу их построения имеют ограниченную область применения и, в частности, не применяются при измерении толщины высокоэлектропроводных металлов в процессе их прокатки.

Рассмотрим конструкцию и принцип действия ВТП, позволяющего с высокой точностью измерить толщину листов, лент и фольги непосредственно при их прокатке.

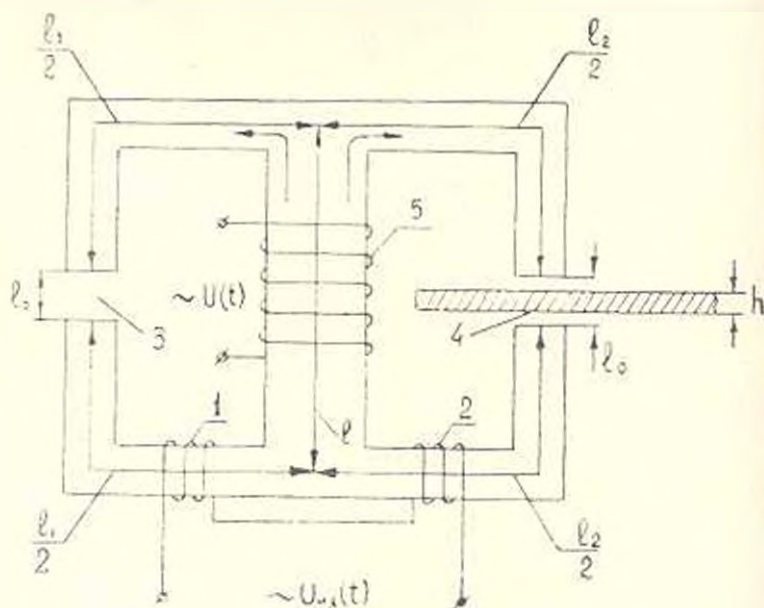


Рис. 1. Конструкция вихретокового преобразователя трансформаторного типа.

Измеритель толщины состоит из трехстержневого симметричного магнитопровода (рис. 1), боковые стержни которого снабжены диф-

рениально включенными измерительными обмотками 1 и 2 и имеют зазоры 3 и 4, в одном из которых помещают контролируемое изделие. На среднем стержне намотана обмотка возбуждения 5. При подключении обмотки возбуждения к источнику питания, ввиду идентичности магнитных потоков боковых стержней, на зажимах измерительной обмотки сигнал отсутствует. Если в один из зазоров внести контролируемое изделие, то на выходе измерительной обмотки появится сигнал, пропорциональный толщине контролируемого изделия.

Наиболее сложной задачей для таких измерителей является определение выражения для выходного сигнала в зависимости от измеряемой толщины h . Для этой цели воспользуемся обозначениями рис. 1. Составим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} u(t) = ri + W' \frac{d\Phi}{dt}; \\ iW + l_2 = Hl + H_0 l_2 + H_{02} l_0; \\ iW = Hl + H_1 l_1 + H_{01} l_0; \\ \Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \end{cases} \quad (1)$$

где $u(t)$, r — напряжения возбуждения и активное сопротивление обмотки возбуждения; Φ , Φ_1 , Φ_2 — потоки соответствующих участков магнитной цепи измерителя; l и l_1 , l_2 — средняя длина неразветвленной и разветвленных частей магнитной цепи; l_0 — длина воздушных зазоров; W' — число витков намагничивающей обмотки; H_{02} , H , H_1 , H_2 , H_{01} — магнитные напряженности поля соответствующих участков; i_1 — эквивалентный вихревой ток в проводящем материале, внесенный в воздушный зазор измерителя.

Выражение для тока i_1 можно получить, исходя из закона электромагнитной индукции [2]:

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = - \frac{\partial \Phi_1}{\partial t}. \quad (2)$$

Представим, что магнитная индукция в воздушном зазоре, где помещен электропроводящий лист (рис. 2), изменяется законом $B(t) = B_m \sin \omega t$. Для простоты примем, что магнитный поток обхватывает лист площадью, имеющий круглую форму диаметром $2a$.

Левая часть уравнения (2) представляет суммарную э.д.с., наведенную в проводящем листе, и поэтому

$$e = \oint \vec{E} d\vec{l} = 2\pi R E(R),$$

где R — текущий радиус площади S , обхватываемый магнитным потоком $\Phi_1 = B(t) S$.

С учетом последнего, выражение (2) примет вид

$$2\pi R E(R) = -\pi R^2 B_m \cos \omega t.$$

Напряженность электрического поля в проводящем листе определяется:

$$E(R) = \frac{\omega B_m}{2} R \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

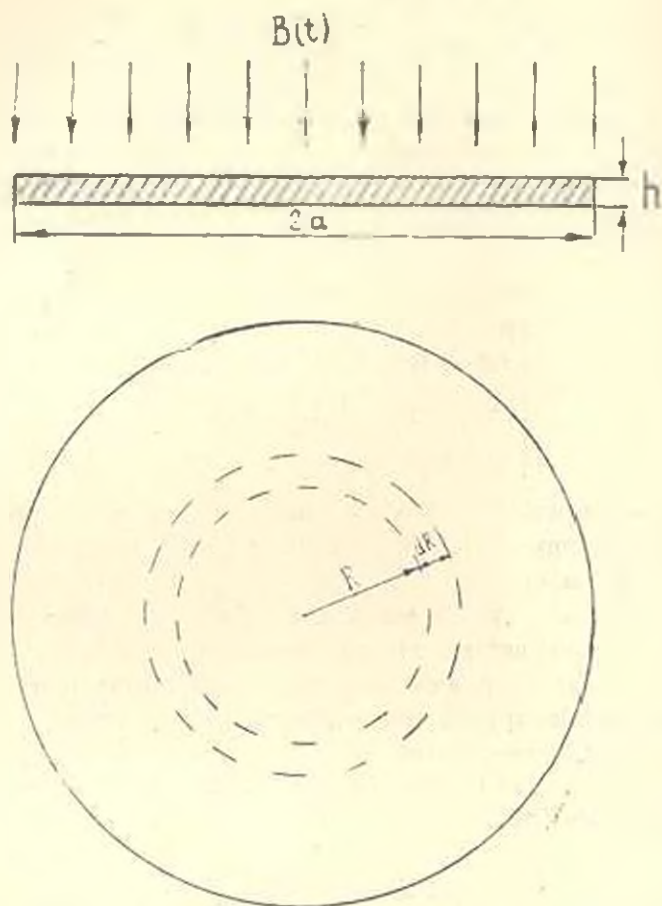


Рис. 2. К определению эквивалентного вихревого тока в проводящем изделии.

при этом плотность тока проводимости в листе будет:

$$z(R) = \gamma E(R) = \frac{\gamma \omega B_m}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

где γ — удельная электрическая проводимость листа. Окончательно получим выражение для тока в проводящем листе:

$$i_e = \int_S z(R) dS = \int_0^a z(R) h dR,$$

где $dS = h dR$; h — измеряемая толщина листа, или

$$i_1 = \gamma \omega h \frac{B_m a^2 \pi}{4\pi} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\gamma \omega h}{4\pi} \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (3)$$

Считая, что сечения стержней магнитопровода одинаковые и равны S' , для напряженностей поля отдельных участков получим:

$$H = \frac{1}{\mu \mu_0} \cdot \frac{\Phi}{2S'}; \quad H_1 = \frac{1}{\mu \mu_0} \cdot \frac{\Phi_1}{S'}; \quad H_2 = \frac{l}{\mu \mu_0} \cdot \frac{\Phi_2}{S'};$$

$$H_{01} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Phi_1}{S'}; \quad H_{02} = \frac{l_0}{\mu_0} \cdot \frac{\Phi_2}{S'}.$$

Учитывая эти выражения, второе и третье уравнения из системы (1) перепишем в таком виде:

$$iW + l_2 = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi + \frac{l_1}{\mu \mu_0 S'} \Phi_1 + \frac{l_0}{\mu_0 S'} \Phi_1;$$

$$iW = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi + \frac{l_2}{\mu \mu_0 S'} \Phi_1 + \frac{l_0}{\mu_0 S'} \Phi_2.$$

Последние выражения с учетом четвертого уравнения из системы (1) примут вид:

$$iW + l_2 = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi_2 + \left(\frac{l}{\mu \mu_0 2S'} + \frac{l_1}{\mu \mu_0 S'} + \frac{l_0}{\mu_0 S'} \right) \Phi =$$

$$= \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi_2 + K_1 \Phi_1;$$

$$iW = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi_1 + \left(\frac{l}{\mu \mu_0 2S'} + \frac{l_2}{\mu \mu_0 S'} + \frac{l_0}{\mu_0 S'} \right) \Phi_2 = \frac{l \Phi_1}{\mu \mu_0 2S'} + K_2 \Phi_2,$$

где

$$K_1 = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} + \frac{l_1}{\mu \mu_0 S'} + \frac{l_0}{\mu_0 S'}; \quad K_2 = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} + \frac{l_2}{\mu \mu_0 S'} + \frac{l_0}{\mu_0 S'}.$$

Ввиду симметрии магнитной цепи можно принимать, что $l_1 = l_2$ и при этом $K_1 = K_2 = K$.

Так как магнитопровод ВТП имеет воздушные зазоры, то с небольшим допущением можно принимать, что $\mu = \text{const}$. Если к обмоткам возбуждения приложено напряжение, изменяющееся по синусоидальному закону, то процессы, происходящие в измерителе, будут аналогичными. Тогда исходная система уравнений может быть представлена в комплексной форме:

$$\begin{cases} U = rI + j\omega W'(\Phi_1 + \Phi_2); \\ iW + l_2 = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi_2 + K\Phi_1; \\ iW = \frac{l}{\mu \mu_0 2S'} \Phi_1 + K\Phi_2; \\ \Phi = \Phi_1 + \Phi_2. \end{cases} \quad (4)$$

Для подтверждения теоретических результатов были изготовлены измерители с различными конструктивными параметрами. Например, преобразователь с параметрами: $l_1 = l_2 = 721 \text{ мм}$; $l = 54 \text{ мм}$; $l_0 = 2 \text{ мм}$; $S = 64 \text{ мм}^2$; $W = 500$; $W_1 = 800$; материал сердечника — Э44, и при $U_0 = 6 \text{ В}$; $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ имел следующую характеристику, снятую для алюминия марки А-99 (табл.).

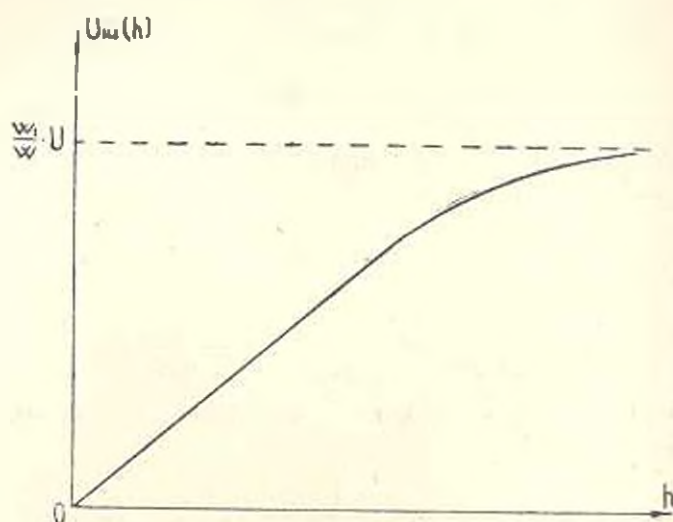


Рис. 3. Выходная характеристика преобразователя.

Таблица

U_{ω}	теор., мВ	42,5	83,2	147	198,8	212,5	246,5	293	334,6	378,2	418,3
	исп., мВ	40,7	80,9	140	190,6	200,3	239,4	279,8	319,6	359,6	399,7
h	мм	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

Опытный образец толщиномера имеет следующие технические характеристики.

1. Диапазон измерений, мм 0... 1000
2. Погрешность измерений, % от верхнего предела измерений ± 2
3. Температура окружающей среды, °С -10 до +40
4. Относительная влажность до 95%
5. Температура контролируемой ленты, °С -10 до +165
6. Скорость перемещения ленты, м/с 0 до 10
7. Напряжение питания, В 220
8. Частота, Гц 50
9. Потребляемая мощность, Вт 10
10. Масса, кг 5
11. Габариты, мм 120×200×250

Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения по сравнению с активным значительно больше ($\omega L \gg r$), поэтому последним можно пренебречь. Учитывая это, из системы (4) получим:

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \frac{U}{W} \frac{4\pi(l_1 + l_0\mu)}{4\pi\omega(l_1 + 2l_0\mu + l_1)j - \omega^2\gamma h\mu\mu_0 S'}; \\ \Phi_2 &= \frac{4\pi(l_1 + l_0\mu) + j\omega\gamma h\mu\mu_0 S'}{4\pi(l_1 + l_0\mu)} \Phi_1.\end{aligned}$$

Суммарное напряжение на зажимах измерительной обмотки при встречном включении будет:

$$U_{из} = U_2 - U_1 = j\omega W_1 \Phi_2 - j\omega W_1 \Phi_1, \quad (5)$$

где W_1 — число витков измерительных обмоток.

С учетом значения Φ_1 и Φ_2 выражение (5) примет вид:

$$U_{из} = U \frac{W_1}{W} \left| \frac{(\omega\mu\mu_0 S' \gamma h)^2}{(\omega\mu\mu_0 S' \gamma h)^2 + 64\pi^2(l_1 + \mu l_0)^2} + j \frac{8\pi\omega\mu\mu_0 S' \gamma h(l_1 + \mu l_0)}{(\omega\mu\mu_0 S' \gamma h)^2 + 64\pi^2(l_1 + \mu l_0)^2} \right|.$$

действующее значение которого будет:

$$U_{из}(h) = U \frac{W_1}{W} \frac{\omega\mu\mu_0 S' \gamma h \sqrt{(\omega\mu\mu_0 S' \gamma h)^2 + 64\pi^2(l_1 + \mu l_0)^2}}{(\omega\mu\mu_0 S' \gamma h)^2 + 64\pi^2(l_1 + \mu l_0)^2}.$$

Анализ функции $U_{из}(h)$ осуществим, пользуясь упрощенной формой записи. Для этого обозначим:

$$U \frac{W_1}{W} = K; \quad \omega\mu\mu_0 S' \gamma = a; \quad 64\pi^2(l_1 + \mu l_0)^2 = b.$$

После небольших преобразований окончательно получим:

$$U_{из}(h) = \frac{ah}{\sqrt{a^2 h^2 + b}} K.$$

Найдем критические значения функции. Для этого определим $\frac{dU_{из}}{dh}$ и приравняв ее к нулю, получим:

$$K(a^2 h^2 + b - a^2 h^2) = 0.$$

Из этого следует, что функция $U_{из}(h)$ не имеет критических значений. Она монотонно возрастающая и $U_{из}(h) = 0$, $D_{из}(h) = U \frac{W_1}{W}$.

На рис. 3 показана зависимость выходного сигнала от измеряемой толщины. Фазовый сдвиг между приложенным и измеряемым напряжениями определяется

$$\varphi = \arctg \frac{8\pi(l_1 + \mu l_0)}{\omega\mu\mu_0 S' \gamma h}.$$

Разработанный измеритель установлен на Канакерском алюминиевом заводе для непрерывного измерения толщины прокатки ленты на стане «КВАРТО—250» [3]

ЕрПИ им. К. Маркса

8. X. 1981

Ե. Ս. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Վ. Բ. ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ

ՕՒԱՅԻՆ ԲԱՑԱԿՈՎ ՄԵՐԿԱ-ՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ ՀԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ՉԱՓԻՉԻ
ՏՆՍԱԿԱՆ ՀԱՐՑԵՐԸ ԵՎ ԿՈՐՄԱԿԱՆ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Դիտարկվում է արանսֆորմատորային տիպի մերկա-հոսանքային փոխակերպիչի մի քանի կոնստրուկտիվ առանձնահատկությունները: Իրականացված է տեսական հետազոտություն՝ հենվելով փոխակերպիչում տեղի ունեցող ֆիզիկական պրոցեսները ընթացող հավասարումների վրա: Բերված է հաստատություն շափող սարքի տեխնիկական ընթացիկը, որը մշակվել է՝ Լինելով այդ հետազոտումից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Канка В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий.— М.: Машиностроение, 1976.—326 с.
2. Поливанов К. М. Теория электромагнитного поля.— М.: Энергия, 1975.— 207 с.
3. Нерсисян В. Б., Манукян Е. С. Отчет по проектно-конструкторской работе «Исследование и разработка устройства, а также его внедрение на прокатном стане «КВАРТО—250» и на травильном агрегате для непрерывного измерения толщины алюминиевой ленты и конденсаторной фольги».—ЕрПИ, ТК 995/80, № 60040545 гос. рег., 1981 — 42 с.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. К. БРУТЯН

СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ МАРКОВСКИХ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ АППРОКСИМАЦИИ

1. *Введение.* Проблема синтеза нелинейных марковских управляемых систем (МУС) исследована незначительно [1, 2]. Общий метод, применяемый в этих случаях, заключается в разложении нелинейной функции в окрестности номинального значения в ряд Тейлора, в котором затем берется несколько первых членов [3, 4]. Такой подход, как показано ниже, требует решения нелинейной детерминированной задачи, что связано с известными трудностями. За исключением случая, когда случайные возмущения малы, этот метод не дает удовлетворительных результатов.

В настоящей статье для синтеза нелинейных МУС, подверженных большому возмущению, используется метод статистической линеаризации с целью построения линейной эквивалентной системы с переменными параметрами. Задача синтеза нелинейных МУС расчленяется на две, связанные между собой, задачи. Предлагается алгоритм последовательного приближения для синтеза субоптимального закона управления. На конкретном примере иллюстрируется применение полученных результатов.

2. *Постановка задачи.* Рассматривается непрерывная МУС, описываемая уравнением

$$dx(t, \omega) = \psi[x(t, \omega)] dt + D(t)u(t, \omega) dt + G(t)d\tilde{z}(t, \omega), \quad (1)$$
$$x(t_0, \omega) = x_0(\omega).$$

Здесь $x(t, \omega)$ — n -мерный вектор состояния; $u(t, \omega)$ — r -мерный вектор управления; $\tilde{z}(t, \omega)$ — n -мерный винеровский процесс с числовыми характеристиками:

$$M\{d\tilde{z}(t, \omega)\} = 0; \quad M\{d\tilde{z}'(t_1, \omega) \cdot d\tilde{z}(t_2, \omega)\} = S_{\tilde{z}}(t) \delta(t_2 - t_1),$$

где $S_{\tilde{z}}(t)$ — интенсивность процесса $\tilde{z}(t, \omega)$; $\delta(\cdot)$ — дельта функция Дирака; ω — элемент пространства случайных событий Ω .

Начальное значение $x_0(\omega)$ предполагается нормальной случайной величиной, не зависящей от процесса $\tilde{z}(t, \omega)$, с известными характеристиками $M\{x_0(\omega)\} = 0$, $M\{x_0'(\omega) x_0(\omega)\} = \Gamma_0$, где Γ_0 — положительно определенная матрица. Вектор-функция $\psi[x(t, \omega)]$ является нелиней-

ной и предполагается, что ее компоненты удовлетворяют равномерному условию Липшица по переменной x и имеют ограничения, т. е. решение уравнения (1) в смысле Ито существует [5, 6].

Требуется найти управление вида

$$u(t) = u[x(t, \omega)], \quad (2)$$

т. е. управление, осуществляемое при помощи обратной связи, которое переводит МУС (1) из $x_0(\omega)$ в $x_T(\omega)$ и минимизирует функционал качества

$$\begin{aligned} J = M\{L[x(t, \omega), u(t, \omega)]\} &= \frac{1}{2} M\{x'_T(\omega) \Gamma_T x_T(\omega) + \\ &+ \int_0^T [x'(t, \omega) B(t) x(t, \omega) + u'(t, \omega) E(t) u(t, \omega)] dt\} = \\ &= \int_{R^n} L[x(t, \omega), u(t, \omega)] f_n(x(t, \omega)) dx(t, \omega), \end{aligned} \quad (3)$$

где L — положительно полуопределенная функция $x(t, \omega)$; Γ_T , B и E — $n \times n$ -, $n \times n$ - и $r \times r$ -мерные ограниченные и непрерывные матрицы, причем элементы этих матриц не зависят от $x(t, \omega)$ и $u(t, \omega)$ ($\Gamma_T \geq 0$, $B \geq 0$, $E > 0$).

К классу допустимых управлений относятся такие, в которых марковский процесс $x(t, \omega)$, определяемый уравнениями (1), (2), имеет однозначную функцию плотности распределения вероятностей $f_n(x(t, \omega))$.

3. Обсуждение задачи. Для нелинейных МУС в литературе применяется разложение функции $\psi(x + \Delta x)$ в ряд Тейлора в окрестности номинальной траектории $\bar{x}(t)$, которое приводит к уравнениям

$$\dot{\bar{x}}(t) = \psi(\bar{x}(t)) + D(t)\bar{u}(t),$$

$$d\Delta x(t, \omega) = \left[\frac{\partial \psi}{\partial x} / \Delta x(t, \omega) + D(t) \Delta u(t, \omega) \right] dt + G(t) d\bar{z}(t, \omega).$$

Это верно в предположении, что приращение $\Delta x(t, \omega)$ имеет малую вероятностную норму и можно пренебречь членами высших порядков. Если $\Delta x(t, \omega)$ велико, то линеаризация уравнения для приращений, проводимая выше, весьма неудовлетворительна, т. к. операция дифференцирования, связанная с подобным разложением, усиливает влияние шума. В такой ситуации определенные результаты даст метод статистической линеаризации [7].

Для приближенного построения линейной эквивалентной системы методом статистической линеаризации необходимо функцию $\psi[x(t, \omega)]$ представить в виде

$$\psi[x(t, \omega)] = A_0(t) + A_1(t) \Delta x(t, \omega) + e(t, \omega),$$

где $\Delta x(t, \omega) = x(t, \omega) - \bar{x}(t)$ — приращение состояния; $e(t, \omega)$ — ошибка аппроксимации.

Коэффициенты разложения $A_0(t)$ и $A_1(t)$ определяются так, чтобы математическое ожидание квадрата ошибки $e(t)$, т. е. $M\{e^2(t, \omega)\}$, было минимальным по отношению к выбору $A_0(t)$ и $A_1(t)$. Применение методов вариационного исчисления к решению этой задачи дает для $\min M\{e^2(t, \omega)\}$ следующие необходимые и достаточные условия:

$$A_0(t) = M\{\psi[x(t, \omega)]\}; \quad A_1(t) = M\{\Delta x'(t, \omega) \Delta x(t, \omega)\}^{-1} R(t).$$

Следует заметить, что из-за нелинейности распределение случайного процесса $x(t, \omega)$ не является нормальным. Однако можно предположить, что при интегрировании нелинейной функции управляемой системы обеспечивается достаточная фильтрация и процесс $x(t, \omega)$, определяемый уравнением (1) для некоторого управления $u(t, \omega)$, является близким к нормальному с математическим ожиданием $\bar{x}(t) = M\{x(t, \omega)\}$ и дисперсией $R(t)$ ошибки состояния [3]. Поскольку ниже закон управления предполагается линейной, то вектор управления также близок к нормальному процессу с математическим ожиданием $\bar{u}(t) = M\{u(t, \omega)\}$. Это значит, что для $\Delta x(t, \omega)$ справедливо выражение

$$\Delta x(t, \omega), R(t) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |R(t)|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \Delta x'(t, \omega) R^{-1}(t) \Delta x(t, \omega)\right\}.$$

С помощью плотности распределения вероятностей и исходной системы (1) можно получить эквивалентные уравнения

$$\bar{\psi}(\bar{x}, \bar{u}, R) = 0, \quad (4)$$

$$d\Delta x = [A(\bar{x}, \bar{u}, R) \Delta x + D(\bar{x}, \bar{u}, R) \Delta u] dt + G dz, \quad (5)$$

где Δu является приращением управления, т. е.

$$\Delta u(t, \omega) = u(t, \omega) - \bar{u}(t). \quad (6)$$

Таким образом, решение стохастического уравнения (1), которое является марковским процессом в n -мерном евклидовом пространстве состояний R^n , можно рассматривать как результат возмущения детерминированной траектории $\bar{x}(t)$ случайным процессом $\bar{z}(t)$. Детерминированная траектория является решением уравнения

$$\dot{\bar{x}}(t) = A(\bar{x}, \bar{u}, R) \bar{x}(t) + D(\bar{x}, \bar{u}, R) \bar{u}(t), \quad \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0. \quad (7)$$

Для линейного марковского процесса $x(t, \omega)$, если существует закон управления

$$u(t, \omega) = -E^{-1}(t) D'(t) \Gamma(t) x(t, \omega) = -C(t) x(t, \omega), \quad (8)$$

где матрица усиления $\Gamma(t)$ удовлетворяет, в свою очередь, уравнению

$$-\dot{\Gamma}(t) = A'(t)\Gamma(t) + \Gamma(t)A(t) - \Gamma(t)D(t)E^{-1}(t)D'(t)\Gamma(t) + B(t),$$

$$\Gamma(T) = \Gamma_r, \quad (8)$$

найти его приращение чрезвычайно трудно. Поэтому далее будет нарываться лишь субоптимальный закон управления [8].

Подставляя в (3) приращенные значения переменных и вычитая из нового значения функционала выражение (3), получим:

$$\Delta J = M \left\{ \Delta x_i^*(\omega) \Gamma_r \Delta x_i(\omega) + \int_0^T (\Delta x' B \Delta x + \Delta u' E \Delta u) dt \right\}. \quad (10)$$

при этом учитывалось, что $M\{\Delta x\} = M\{\Delta u\} = M\{d\dot{x}\} = 0$.

Система (5) является уравнением для приращений, а выражение (10) — приращением функционала качества. Очевидно, что закон управления для МУС (1) связан с законом управлением для (7) и (5) соотношением

$$u^*(t) = \bar{u}^*(t) + \Delta u^*(t). \quad (11)$$

Первый член в правой части этого равенства известен из детерминированной теории оптимального управления [2, 5]. Точнее, он равен

$$\bar{u}^*(t) = -C(t)\bar{x}^*(t),$$

где $\bar{x}^*(t)$ — решение уравнения (7) с условием $\bar{u}(t) = \bar{u}^*(t)$.

Второй член можно получить, решив задачу оптимизации в приращениях по функционалу (10). Приращения Δx и Δu находятся, исходя из требования о минимальности математического ожидания квадрата ошибки между нелинейной функцией и ее линейной эквивалентной моделью (5). Это условие записывается в виде

$$\int \int_{R_0} \{\psi_i(\bar{x} + \Delta x, \bar{u} + \Delta u) - [A_i D_i][\Delta x \Delta u]\}^2 f(\Delta x, \Delta u, R_0) d[\Delta x \Delta u] \rightarrow \min,$$

$$i = 1, \dots, n,$$

где $R_0 = \begin{bmatrix} R & -RC' \\ -CR & CRC' \end{bmatrix}$, а матрица R определяется как решение матричного уравнения дисперсии

$$\dot{R}(t) = [A(t) - D(t)C(t)]R(t) + R(t)[A(t) + D(t)C(t)]' +$$

$$+ G(t)S_{xx}(t)G'(t), \quad (12)$$

где A_i, D_i — векторы-строки матриц A, D и представляют собой эквивалентные приращения, которые заменяют нелинейную скалярную функцию $\psi_i(\bar{x} + \Delta x, \bar{u} + \Delta u)$ ($i = 1, \dots, n$).

Решение $[A_i D_i]$, если R_a^{-1} существует, имеет вид:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ D_i \end{bmatrix} = R_a^{-1} \left\{ \int \int_{R^n R^r} [\Delta x \Delta u] \psi_i(\bar{x} + \Delta x, \bar{u} + \Delta u) f(\Delta x, \Delta u, R_a) d[\Delta x \Delta u], \right. \\ \left. (i = 1, \dots, n). \right. \quad (13)$$

Теперь задача синтеза расчленяется на две.

Задача 1. Для заданной матрицы R_a и при ограничениях (4) необходимо найти такое управление $\bar{u}(t)$, чтобы минимизировать функционал

$$J = \bar{J} + \Delta J,$$

где

$$\bar{J} = \frac{1}{2} \left\{ \bar{x}_T' F_T \bar{x}_T + \int_0^T (\bar{x}' B \bar{x} + \bar{u}' E \bar{u}) dt \right\},$$

а ΔJ определяется выражением (10).

Задача 2. При фиксированных значениях $\bar{x}^*$, $\bar{u}^*$, $\bar{x}_T^*$ и ограничениях вида (5) необходимо найти коэффициент обратной связи $C^*(t)$, а значит, Δx^* и R_a^* , чтобы минимизировать функционал (10).

Эти задачи связаны между собой и поэтому требуется найти такое совместное множество $\{\bar{x}^*, \bar{u}^*, C^*, R_a^*\}$, при котором они решаются одновременно.

4. **Алгоритм приближенного решения задачи.** Алгоритм последовательного приближения для вычисления множества $\{\bar{x}^*, \bar{u}^*, C, R_a^*\}$ можно представить с помощью нижеописанных итерационных циклов:

а) выбираются произвольные положительно определенные начальные матрицы R^0 , C^0 и формулируется матрица R_a^0 ;

б) минимизируется функционал $\bar{J}$ при ограничении (4). Это требует решения системы нелинейных уравнений (9) с применением полной численной оптимизации. В результате вычисляются значения $\bar{x}^0$, $\bar{u}^0$;

в) производится оценка A^0 , D^0 с использованием ранее рассчитанных $\bar{x}^0$, $\bar{u}^0$ и R_a^0 ;

г) вычисляется матрица управления C^1 в результате решения уравнений (8), (9), где всюду используется нулевой верхний индекс;

д) вычисляется матрица R^1 , как решение уравнения (12): $(A^0 - D^0 C^1) R^1 + R^1 (A^0 - D^0 C^1)' + \partial S_{11} G' = 0$ и формулируется матрица R_a^1 ;

е) процесс б) — д) продолжается до тех пор, пока разности между матрицами A^1 , A^0 и D^1 , D^0 , полученными на последовательных приближениях итерации, не будут превышать по модулю заданную степень точности.

5. **Пример.** Нелинейная МУС третьего порядка описывается уравнениями:

$$\dot{x}_1 = -4x_1x_2 + 0,1u - 0,01x_1u;$$

$$\dot{x}_2 = -4x_1x_2 + 0,01x_2 - 0,01x_2u;$$

$$\dot{x}_3 = -0,2x_3 + 50\bar{u}.$$

а функционал качества определяется выражением

$$J(x, u) = M \int_0^{40} (0,6x_1^2 + 1,2x_2^2 + 0,1x_3^2 + u^2) dt.$$

При оценке интегралов (13) наличие нелинейностей типа произведения приводит к независимости эквивалентных приращений от R_0 . Вначале вычисляются эквивалентные уравнения. Матрицы A , D и G принимают вид:

$$A = \begin{bmatrix} -(14\bar{x}_2 + 0,01\bar{u}) & -4\bar{x}_1 & 0 \\ -4\bar{x}_2 & -(4\bar{x}_1 + 0,01\bar{u}) & 0,01 \\ 0 & 0 & -0,2 \end{bmatrix};$$

$$D = \begin{bmatrix} 0,1 - 0,01\bar{x}_2 \\ -0,01\bar{x}_2 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 50 \end{bmatrix}.$$

Функционал имеет матрицы

$$B = \begin{bmatrix} 0,6 & 0 & 0 \\ 0 & 1,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 \end{bmatrix} \quad E = 1.$$

На основе полученных результатов, нетрудно заметить, что пара (A^*, D^*) , получаемая исключением 3-го уравнения состояния, является управляемым. Следовательно, уравнения (9) и (13) имеют решения. Так как матрицы A и D не зависят от R_0 , то в качестве начальных матриц можно выбрать значение $R^* = C^* = 0$. Проводя итерацию, сходимость получается на 5-ом этапе и вычисляются следующие конечные значения переменных: $\bar{x}_1^* = 0,1$; $\bar{x}_2^* = 3,6$; $\bar{u}^* = 95$; $C^* = [29,3, 1,5, 0,01]$.

С целью оценки субоптимального закона управления величина функционала качества рассчитывалась для 3-х случаев: 1) синтез в установившемся режиме, когда случайный процесс отсутствует; 2) случайный процесс действует, а управление отсутствует; 3) автоматическая оптимизация осуществляется под действием случайного процесса. В этих трех случаях величина функционала, соответственно, равна 610, 672 и 594. Таким образом, минимальная величина функционала получена в третьем случае.

Данный метод синтеза нелинейных МУС легко применяется и в системах 8-го порядка, когда в уравнениях состояния 14 нелинейно-

стен типа произведения и управление осуществляется скалярной величиной. Для такой МУС величина функционала качества, соответственно, равняется 1412, 1576 и 1403. При введении вектора управления также не возникает затруднений и лишь увеличивается расчетное машинное время, которое для рассматриваемой выше системы 3-го порядка составило 15 с. на машине «Наири-2», а для системы 8-го порядка — 115 с.

Для оценки точности расчетов данного метода синтеза, основанного на статистический линеаризации, проведено моделирование рассмотренной выше МУС 3-го порядка на машине «Наири-2». Интегрирование системы дифференциальных уравнений проводилось обычными способами. Интервал дискретности в 6 раз превышал максимальную постоянную времени МУС. В результате установлено, что расчетные математические ожидания и дисперсии переменных состояния почти точно совпадают с аналогичными величинами, полученными при моделировании МУС на машине «Наири-2». Расхождения не выходят за пределы точности измерений.

Ер. и т. изд. хозяйства

25. 11. 1982

Վ. Կ. ԲՐՈՒՅԱՆ

ՈՉ ԴՅԱՅԻՆ ՄԱՐԿՈՎՅԱՆ ԴՆԿԱՎԱՐՈՒԻ ՀԱՄԱԿԱՐԴԻ ՍԻՆԹԵԶԸ ՎԻՃԱԿԱՍԴՐԱԿԱՆ ԴՅԱՅՆԱՅՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ոչ գծային մարկովյան դեկավարելի համակարգի սինթեզի խնդիրը դիմարկվում է որպես գծայնացման խնդիր: Փոփոխական պարամետրերով համարժեք համակարգ ստանալու նպատակով կիրառվում է վիճակադրական գծայնացման մեթոդը և ոչ գծային մարկովյան դեկավարելի համակարգի ինինվզման խնդիրը բաժանվում է փոփոխարձորեն կապված երկու խնդիրների: Մշակված է մոտավոր հաջորդականության ալգորիթմ՝ սինթեզի այդ խնդիրների լուծման համար: Կոնկրետ օրինակի վրա մեկնաբանված է ստացված արդյունքների կիրառումը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Моисеев Н. Н. Элементы теории оптимальных систем — М.: Наука, 1975.— 528 с.
2. Гойттенберг Я. Н. Автоматическое управление — М.: Наука, 1978 — 552 с.
3. Брутян В. К. Некоторые вопросы применения марковских процессов к исследованию нелинейных автоматических систем.— Ереван: изд. ЕГУ, 1974.— 198 г.
4. Красовский А. А. Фазовое пространство и статистическая теория динамических систем.— М.: Наука, 1974.— 294 с.
5. Флеминг М., Рашел Р. Оптимальное управление детерминированными и стохастическими системами — М.: Мир, 1978 — 316 с.
6. Острел К. Введение в статистическую теорию управления.— М.: Мир, 1973.— 264 с.
7. Пукачев В. С. и др. Основы статистической теории автоматических систем.— М.: Машиностроение, 1974.— 417 с.
8. Брутян В. К. Об одной задаче синтеза нелинейных марковских систем методом подмножимальной аппроксимации.— Автоматика и телемеханика, 1980. № 7, с. 51—61.

ГИДРАВЛИКА

С. Н. ЕНГИБАРЯН, П. И. КОСТАНИАН, К. С. ТАМАНЯН, Ж. М. КАКОЯН

ПРОВАЛЬНЫЕ ТАРЕЛКИ С ФИКСИРОВАННОЙ И РЕГУЛИРУЕМОЙ ПЛОЩАДЬЮ ПРОВАЛА ДЛЯ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ И ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Для проведения различных тепло-массообменных и пылеулавливающих процессов широкое распространение получили противоточные колонные аппараты, в которых для обеспечения эффективного контактирования материальных потоков применяют, так называемые, провальные перфорированные тарелки. Они обеспечивают высокие скорости и глубину обмена между фазами [1].

Известны различные типы провальных тарелок: дырчатые [2, 3], решетчатые или шелевые [4], трубчатые или трубчато-решетчатые [5, 6], волнистые или гофрированные [7, 8], а также провальные тарелки с различной перфорацией [9]. Однако, все перечисленные выше типы тарелок работают только в сравнительно узком диапазоне нагрузок по газу. Процессы обмена и пылеулавливания на них протекают недостаточно интенсивно вследствие неравномерного распределения газа, жидкости и твердой фазы в объеме пенного слоя и возникновения «волнового режима».

На рис. 1а, б, в показаны провальные тарелки с фиксированной площадью провала. Они представляют собой плоский лист с коническими (рис. 1а, б) или цилиндрическими (рис. 1в) отверстиями. Конические отверстия равномерно распределены по всей площади тарелки большими основаниями по ходу газа и жидкой фазы. Аналогичным образом распределены также цилиндрические насадки (рис. 1б, в).

Аппараты с указанными тарелками работают по принципу противотока. Жидкая или охлаждаемая фаза, поступающая сверху, накапливается на тарелке 1 и протекает через отверстия А, обращенные большими основаниями вверх. Газ подается снизу, проходит через отверстия, обращенные большими основаниями вниз и барботирует через жидкость. Так как отверстия, обращенные большими основаниями вниз, не могут удерживать слой жидкости, а отверстия, обращенные большими основаниями вверх, удерживая слой жидкости, будут полностью погружены в жидкость, на них создаются разность гидростатических давлений и условия, чтобы жидкость протекала через отверстия, обращенные большими основаниями вверх, а газ — большими основаниями вниз.

Конструкция тарелки, изображенная на рис. 1б, позволяет увеличивать нагрузки по газу и жидкости за счет увеличения разности гидростатических давлений с помощью цилиндрических насадок 2. Изменение количества проваливаемой жидкости на тарелке, изображенной на рис. 1в, достигается регулированием высоты цилиндрических насадок 2.

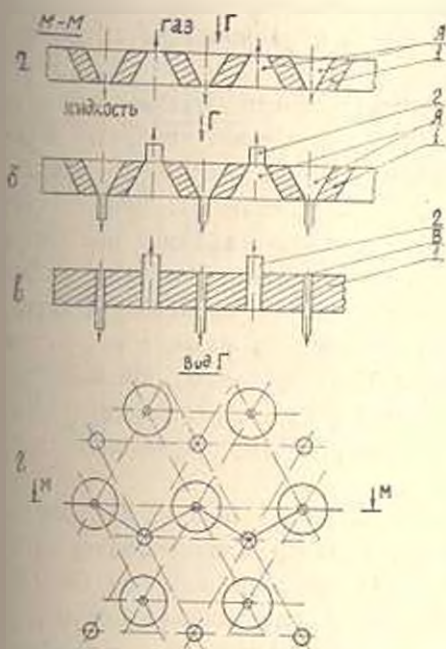


Рис. 1. Провальная тарелка с фиксированной площадью провала: а — с коническими отверстиями (по $M-M$); б — с коническими отверстиями, снабженными цилиндрическими насадками (по $M-M$); в — с цилиндрическими отверстиями, снабженными цилиндрическими насадками. 1 — тарелка; 2 — цилиндрическая насадка. А — коническое отверстие; В — цилиндрическое отверстие.

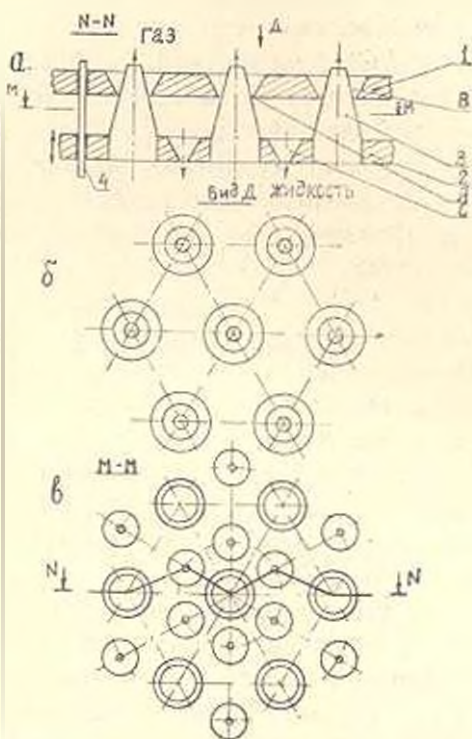


Рис. 2. Пропальная тарелка с регулируемой площадью провала. 1 — верхняя пластина; 2 — нижняя пластина; 3 — коническая насадка; 4 — направляющий стержень; А — кольцевой зазор; В — отверстие верхней пластины; С — отверстие нижней пластины.

37

лагаются соосно с коническими отверстиями В верхней пластины 1, образуя кольцевой зазор А для прохода жидкости.

При помощи дополнительных приспособлений нижняя пластина 2 с коническими соплами 3 может подниматься и опускаться. Этим достигается регулирование площади кольцевого зазора А.

Жидкость поступает на верхнюю пластину 1 и под давлением столба жидкости (или пены) проваливается через кольцевой зазор А на нижнюю пластину 2, откуда сквозь отверстия нижней пластины С, поступает на нижележащую тарелку. Газ проходит сквозь конические сопла 3 нижней пластины 2, участвует в барботаже на верхней пластине 1 и поднимается на вышележащую тарелку. Таким образом достигается четкое разделение потоков газа и жидкости и равномерное их распределение по всему сечению тарелки.

Предложенные конструкции провальных тарелок можно применять для процессов обмена и пылеулавливания в колонных аппаратах в системах газ (пар) — жидкость, газ (пар) — твердое, жидкость — твердое и газ (пар) — жидкость — твердое. Они обеспечивают: образование устойчивой и равномерной структуры двух или трехфазной системы в широких пределах изменения нагрузок материальных потоков; устранение «волнового режима»; равномерное орошение нижележащей тарелки; регулирование количества проваливающейся фазы, в результате которых повышается интенсивность и глубина процессов обмена и пылеулавливания. Провальные тарелки указанных конструкций (рис. 1б, в, рис. 2) устраняют также инкрустации отверстий при кристаллизации, пылеулавливании и т. д.

В таблице приведены результаты испытаний одной из предложенных конструкций провальных тарелок (рис. 1б) для процессов пылеулавливания быстросхватывающей пыли сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с размером частиц меньше 63 мкм, со следующими параметрами: толщина тарелки — 10 мм; угол конусности отверстия $\alpha = 45^\circ$; диаметр, высота и количество цилиндрических насадок для прохода газа, соответственно — 5,5 мм, 10 мм и 19 шт; диаметр, высота и количество цилиндрических насадок для провала жидкости — 2 мм, 12 мм и 18 шт; свободное сечение для прохода газа — 15,8%, свободное сечение для провала жидкости — 1,33% и 2%; диаметр аппарата — 60 мм.

Одновременно испытывали обычную провальную тарелку со свободным сечением, равным суммарному сечению всех отверстий для прохода газа и провала жидкости — 17,6%.

В результате испытаний установлено:

1. Предложенная конструкция провальной тарелки при всех испытанных скоростях газа обеспечивала раздельное прохождение фаз через тарелку.

2. При скорости газа 1,5 м/с (в полном сечении аппарата) и концентрации пыли 5 г/м³ предложенная провальная тарелка работала непрерывно в течение 30 ч. не забиваясь, между тем, как обычная провальная тарелка при тех же условиях забивалась через 3—4 ч.

3. Предложенная провальная тарелка повышает эффективность пылеулавливания на 8—12%.

Таблица

Влияние конструкции тарелки на ее работу и эффективность пылеулавливания

№ п/п	Тип тарелки	Скорость воздуха на полном сечении аппарата W_r , м/с	Гидравлическое сопротивление сухой тарелки, ΔH , мм вод. ст.	Расход воды G , л/ч	Высота пенного слоя H_p , мм	Количество отверстий для провала жидкости $n_{\text{пр.ж}}$	Диаметр отверстий для провала жидкости $d_{\text{пр.ж}}$, мм	Концентрация пыли до аппарата C_H , г/м ³	Концентрация пыли после аппарата C_K , г/м ³	Степень улавливания, %	Примечания
1	Предложенная тарелка	1,3	10	30	115	12	2	5,101	0,034	99,33	1. При $W_r > 1,8$ м/с провал уменьшился
2		1,5	13	24	125	12	2	4,995	0,034	99,32	
3		1,7	15	24	140	18	2	4,747	0,024	99,49	
4		1,8	16	24	150	18	2	4,854	0,014	99,71	
1	Обычная провальная тарелка	1,3	11	24	130	—	—	5,112	0,441	91,38	1. H_p имеет завышенное значение за счет «волнового режима» 2. При $W_r > 1,6$ м/с провал сильно уменьшился
2		1,5	13	24	150	—	—	4,897	0,615	87,44	
3		1,6	16	24	175	—	—	4,877	0,554	88,65	

4. При повышении свободного сечения отверстий для прохода газа до 20—25% удалось повысить скорость газа в полном сечении аппарата до 3 м/с, не нарушая при этом раздельного прохождения фаз. При применении обычной провальной тарелки с таким свободным сечением при скорости газа 3 м/с вообще не происходит провала жидкости.

ИОНХ АН АрмССР

22. X. 1981

Ս. Ն. ՆԱԳԻՐԱՐԱՆ, Պ. Ի. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ, Բ. Ս. ԹԱԼԱՆՅԱՆ, Ժ. Մ. ԿԱԼՈՅԱՆ
ՋԵՐՄԱՆԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆԱՎԱՐՈՒՄ ԵՎ ՓՈՇԵԿԱՐՋՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ
ՀԱՄԱՐ ԿԻՐԱԽՎՈՂ՝ ՍԱՀՄԱՆՎԱԾ ԵՎ ԿԱՐԽԱՎՈՐՎՈՂ
ՄԱԿԵՐԵՍՈՎ ԱՓՍԵՆԵՐ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Մշակված են հակահոսքով աշխատող աշտարակի ափսեների նոր կառուցվածքներ, որոնք քույր են տալիս մեծաքանակ աշտարակ ստիճող «հեղուկ-գազ» ֆազերի բանակները, առանց ափսեի վրա «ալիքային ուժեր» առաջացնելու, ապահովում են համապատասխան փրփրաշերտի առաջացում, ներքին ափսեի ամբողջ մակերեսով հեղուկի հավասարաչափ սնուցում և նրա բանա-

կության կարգավորում: Նշված առավելությունները բերում են նյութափոխանակման և փոշեկորրգման պրոցեսների ինտենսիվություն ու խորություն մեծացման և ափսիսի անցքերի փակման երևույթի վերացման:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Рамм В. М. Абсорбция газов.— М.: Химия, 1976.— 430 с.
2. Позин М. Е., Мухленов И. П. и др. Пенный способ обработки газов и жидкостей.— Л.: Госхимиздат, 1959.— 123 с.
3. Касаткин А. Г., Дытнерский Ю. И. и др. Гидравлические закономерности процессов на барботажных тарелках провального типа.— Хим. пром., 1961, № 7, с. 482—491.
4. Сум-Ших Л. Е., Азрова М. Э., Быстрова Т. А. Исследование уноса и гидродинамический расчет колонн с беспереливными тарелками.— Хим. пром., 1963, № 1, с. 63—68.
5. Азрова М. Э., Быстрова Т. А. и др. Трубчато-решетчатые тарелки. Гидравлическое сопротивление, эффективность и теплопередача.— Хим. пром., 1960, № 1, с. 62—66.
6. Касаткин А. Г., Дытнерский Ю. И. и др. Расчет колонн с трубчатыми провальными тарелками.— Хим. пром., 1963, № 4, с. 279—286.
7. Дытнерский Ю. И., Александров Н. А. и др. Исследование закономерностей гидравлики и массообмена в колоннах с волнистыми тарелками провального типа.— Хим. пром., 1964, № 1, с. 70—74.
8. Александров Н. А., Скобла А. И. Механический унос жидкости газом с тарелкой провального типа.— Химия и техн. топлива и масел, 1960, № 9, с. 42—54.
9. Родионова А. И., Марченко В. Ф. Испытание ситчатых тарелок, имеющих две перфорации.— Журн. прикл. хим., 1960, 33, № 5, с. 1101—1108.

ГИДРАВЛИКА

Э. П. АЩЯНЦ

РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ ОТВЕРСТИЙ В ТАРЕЛИ ОБРАТНОГО
КЛАПАНА С ЦЕЛЮ ЭФФЕКТИВНОГО ГАШЕНИЯ
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА

В магистральных нагнетательных трубопроводах насосных станций при аварийном отключении электропитания двигателей насосов гидравлический удар возникает, в основном, при закрытии обратных клапанов, установленных на трубопроводе. Так как в большинстве случаев магистральный трубопровод имеет значительную длину, а инерционные свойства насосных агрегатов малы, то в нагнетательном трубопроводе имеет место явление прямого гидравлического удара.

Одним из простых и эффективных способов гашения гидравлического удара является использование обратных клапанов, в тарели которых имеются отверстия. Использование такой конструкции гасителя на насосной станции не всегда является целесообразным, однако, в случае возможности их применения, основная задача расчета состоит в определении суммарной площади отверстий в тарели клапана, необходимой для эффективного гашения удара.

В работе [1] при определении площади сбросных отверстий гасителей предполагается, что истечение жидкости из сбросного отверстия гасителя происходит под постоянным статическим напором и величина сбрасываемого расхода известна. Такая постановка задачи является неточной, т. к. в процессе гашения гидравлического удара истечение жидкости из отверстия происходит под переменным напором и поэтому расчет по рекомендуемой в [1] формуле даст заниженные значения площади сбросного отверстия гасителя.

Допустим, что на нагнетательном трубопроводе насосной станции установлен обычный обратный клапан без отверстий в тарели. В этом случае максимальный напор при гидравлическом ударе H_u определяется согласно рекомендациям, имеющимся в существующих руководствах [2]. Такой напор возникает в трубопроводе в результате гашения до нуля скорости течения жидкости у обратного клапана.

При наличии отверстий в тарели клапана величина гидравлического удара уменьшается, т. к. в нагнетательном трубопроводе существует некая пороговая непогашенная скорость u_0 .

Используя формулу, предложенную в [3], величину напора при гидравлическом ударе, можно представить в виде:

$$H = H_m - \frac{av_1}{g}, \quad (1)$$

где a — скорость распространения волны гидравлического удара; g — ускорение силы тяжести.

Для определения v_1 используется условие неразрывности течения у обратного клапана:

$$v_1 \Omega = v \omega, \quad (2)$$

где Ω , ω — площади сечения нагнетального трубопровода и отверстия; v — скорость жидкости при истечении из отверстия.

Обозначив $v\omega = Q$ и подставив это выражение в (1), получим:

$$H = H_m - \frac{aQ}{g\Omega}. \quad (3)$$

В формуле (3) неизвестными являются величина повышения напора H и сбрасываемый через отверстие расход Q . Для решения задачи задаемся допустимой величиной повышения напора H_1 , которая может меняться в пределах $H_0 \leq H_1 \leq H_m$, где H_0 — статический напор в трубопроводе у обратного клапана.

Имея H_m и H_1 , определяется расчетный расход, который необходимо сбросить из напорного трубопровода, чтобы обеспечить заданное повышение напора при гидравлическом ударе:

$$Q = (H_m - H_1) \frac{g\Omega}{a}. \quad (4)$$

Рассматривая процесс истечения жидкости из отверстия за бесконечно малый промежуток времени как установившийся, с достаточной точностью мгновенный расход можно определить по известной формуле гидравлики:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gh}, \quad (5)$$

где μ — коэффициент расхода; ω — площадь отверстия в тарели клапана; h — напор над центром отверстия.

Сброс расхода воды через отверстие происходит под переменным напором ($0 < h \leq H_1$) и, следовательно, $h = f(t)$, где t — время.

Экспериментальные исследования показывают, что характер повышения напора у обратного клапана при истечении воды из отверстия в общем случае можно представить кривой

$$h(t) = at^b e^{ct} + h_n, \quad (6)$$

где коэффициенты a , b и c зависят от площади отверстия в тарели обратного клапана ($c < 0$, $b \geq 1$). При прямых гидравлических ударах время изменяется в интервале $0 \leq t \leq 4l/a$ (h_n — избыточный на-

пор у обратного клапана, когда скорость движения воды в трубопроводе равна нулю).

За определенный промежуток времени $t = T_n = 2l/a$ с начала истечения жидкости из отверстия функция (6) достигает максимума: $h(T_n) = H_2$. За этот промежуток времени из трубопровода должен вытечь такой объем жидкости, чтобы обеспечить заданное повышение напора. Для обеспечения сброса такого объема воды необходимо выполнение равенства

$$(H_M - H_2) \frac{2gT_n}{a} = \mu \sqrt{2g} \int_0^{T_n} V \overline{h(t)} dt. \quad (7)$$

Из соотношения (7) определяется искомая площадь отверстия в тарели обратного канала:

$$\mu = \frac{(H_M - H_2) 2 \sqrt{g} T_n}{T_n \int_0^{T_n} V \overline{h(t)} dt} \quad (8)$$

Для предварительной оценки величины площади отверстия можно допустить, что за промежуток времени $0 < t \leq T_n$ повышение напора у обратного клапана происходит по линейной зависимости. В этом случае функция (6) приобретает вид:

$$h(t) = \frac{(H_2 - h_n)t}{T_n} + h_n, \quad (9) \quad \text{Рис. График зависимости } \omega = f(k)$$

а площадь отверстия определяется по формуле

$$\omega = \frac{1.06 (H_M - H_2) 2 \sqrt{g} (H_2 - h_n)}{a \mu (H_2^{3/2} - h_n^{3/2})} \quad (10)$$

Если в момент остановки колонны жидкости в трубопроводе давление у обратного клапана равно атмосферному, то $h_n = 0$ и формула (10) упрощается:

$$\omega = \frac{1.06 (H_M - H_2) 2 \sqrt{g}}{\mu \sqrt{H_2}} \quad (11)$$

Для того, чтобы иметь некоторое представление о величине ω , при которой достигается желаемое гашение гидравлического удара, допустим, что $H_M = kH_2$ и $\frac{\omega}{2} = \bar{\omega}$. Тогда формула (11) приобретает вид

$$\bar{\omega} = \frac{1.06 (k - 1) \sqrt{gH_2}}{a \mu} \quad (12)$$



График зависимости $\omega = f(k)$ представлен на рис. При построении графика принято $a = 1000$ м/с и $\mu = 0,62$.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при наличии нескольких отверстий в тарели клапана гашение гидравлического удара лучше, чем при одном отверстии с площадью эквивалентной их суммарной площади. Сопоставление результатов расчета по формуле (11) с соответствующими экспериментальными данными приведено в [4].

Пример. Магистральный трубопровод насосной станции с. Ахунк в Арм.ССР имеет диаметр 300 мм, длину 825 м и подает воду на высоту 60 м. В здании станции после насосов установлены обратные клапаны диаметром 200 мм. При аварийном отключении электропитания двигателей насосов максимальный напор у обратного клапана достигал величины 128 м.

В процессе проведения экспериментов на станции, в тарели обратного клапана были просверлены четыре отверстия, диаметр которых постепенно увеличивался. Вначале диаметр отверстий был равен 16 мм. При этом максимальный напор в трубопроводе при гидравлическом ударе достигал величины 102 м, а скорость распространения волны гидравлического удара — 1100 м/с.

Расчетное значение повышение напора, определяемое по формуле (11), дает величину, равную 103 м, а по формуле, рекомендуемой в [1] — 56 м, что значительно меньше его истинного значения. При наличии в тарели клапана четырех отверстий диаметра 18 мм максимальный напор в трубопроводе уменьшился до величины 96 м. Расчет по формуле (11) дает величину напора, равную 98 м. В случае, когда диаметр отверстий увеличили до 20 мм, повышение напора составило 86 м. Согласно расчету этот напор составляет 92 м, что свидетельствует об удовлетворительном совпадении расчетных и экспериментальных данных.

АрмНИИВПиГ

16. XII 1980

Է. Պ. ԱՇԽԱՆՅ

ՀԵՏԱԴԱՐՁ ՓԱԿԱՆՈՒՄ ՍԿԱՎԱՌԱԿԻ ԱՆՅՔԵՐԻ ՄԱԿԵՐՆՍԵՐԻ
ՀԱՇՎԱՐԿԸ ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՀԱՐՎԱԾԻ ԷՅԵԿՏԻՎ ՄԱՐՄԱՆ
ՆՊԱՏԱԿՈՎ

Ա. մ փ ո վ ո ռ մ

Պոմպակայանների մոտոլ խողովակաշարերում հիդրավլիկական հարվածի մարման եղանակներից մեկը համարվում է հետադարձ փականների օգտագործումը անցքեր ունեցող սկավառակներով:

Առաջարկվում է սկավառակի անցքերի մակերեսների հաշվման բանաձև, որը հիդրավլիկական հարվածի դեպքում ապահովում է նախօրոք տրված

Հնչման Դարձրաշունժը: Հաշվման արդյունքները համեմատված են փորձարկման արդյունքների հետ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Сурин А. А. Гидравлический удар в подпроводах и борьба с ним.— М.: Трехсвязь-дортрудат, 1946.— 371 с.
2. Указания по защите водопроводов от гидравлических ударов.— М.: Гостройиздат, ВОДГЕО, 1961.— 227 с.
3. Жуковский Н. Е. Гидравлический удар в водопроводных трубах.— М.—Л.: Гос. изд. техн.-теор. лит., 1949 — 104 с.
4. Ациянц Э. П., Рафаэлян Р. М. Гашение гидравлического удара с помощью обратного клапана.— Гидротехника и мелиорация, 1982, № 1, с. 45—46.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

А. А. САРУХАНЯН

РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО КОЛПАКА ГИДРОТАРАНА

Воздушный колпак является неотъемлемой частью гидротарана и создает воздушную подушку с целью смягчения пульсации в нагнетательном трубопроводе и предотвращения чрезмерного повышения давления в системе. Недостаток воздуха вызывает сильную пульсацию, снижение производительности и КПД, а иногда и разрыв труб от чрезмерного повышения давления. Большой же объем воздушного колпака неэкономичен из-за повышения металлоемкости.

Расчет объема воздушного колпака сводится к определению необходимого объема воздуха для поддержания колебания давления в нужных пределах.

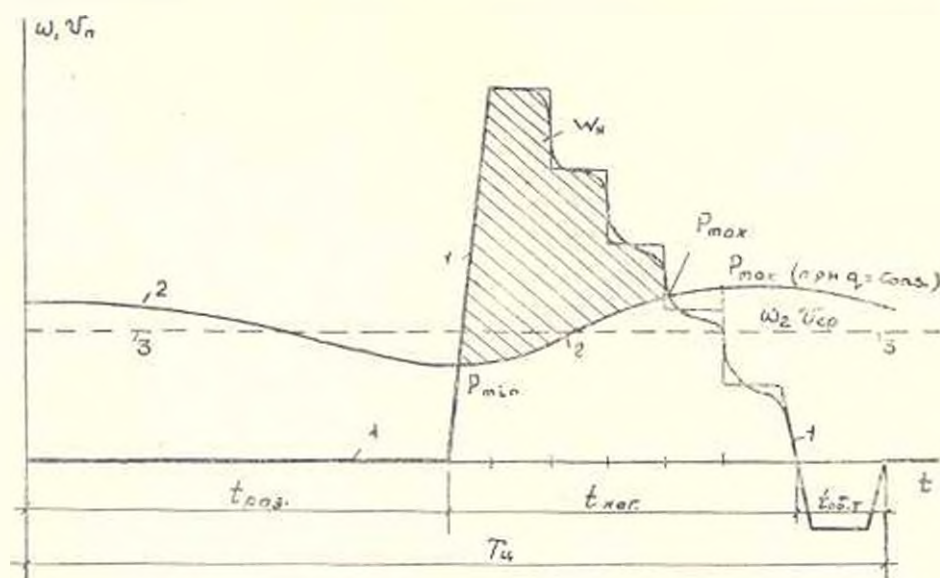


Рис. 1. Схема работы воздушного колпака гидротарана.

Работа воздушного колпака показана на рис. 1. Подача жидкости в воздушный колпак (кривая 1) происходит в конце периода разгона и продолжается в течение нагнетательного периода, а истечение происходит постоянно. Кривая 2 показывает действительное истечение, а кривая 3 — среднее во времени. Заштрихованный объем жидкости

W_n помещается в воздушном колпаке, который и приводит к изменению давления. При известном объеме W_n можно определить объем воздушного колпака, но точное определение значения W_n невозможно. Кроме того, в существующих формулах [1—4] не учитывается нестационарность движения жидкости, заключенной в нагнетательном трубопроводе.

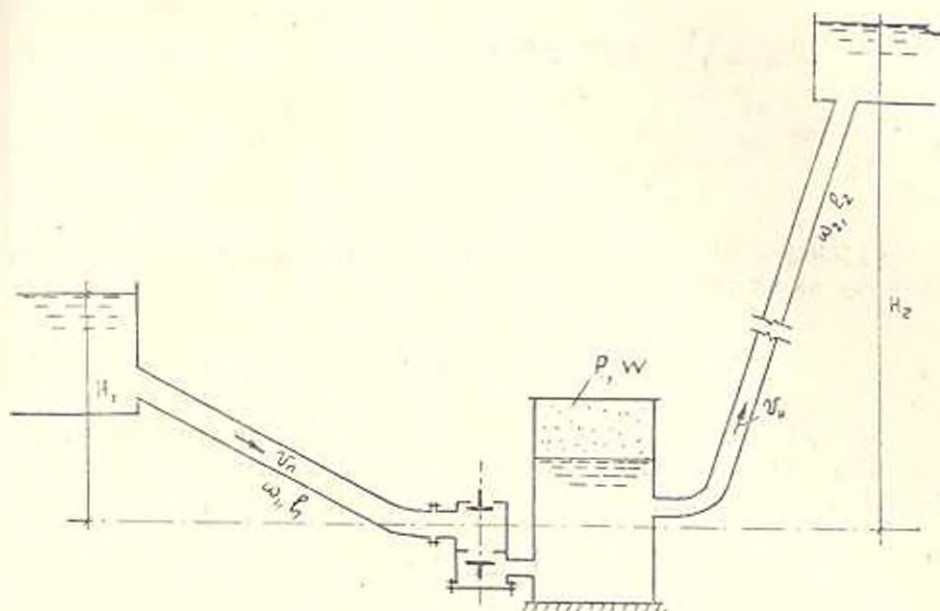


Рис. 2. К расчету воздушного колпака гидротарана.

В основе решения задачи ставится схема работы воздушного колпака, приведенная на рис. 1. В момент закрытия ударного и открытия нагнетательного клапанов (при $t = 0$) в питательной, нагнетательной трубах и в воздушном колпаке (рис. 2) начинается неустановившееся движение, которое в питательной трубе описывается уравнением:

$$H_1 = \frac{p}{\rho g} - \frac{l_1}{g} \cdot \frac{dv_n}{dt}, \quad (1)$$

а в нагнетательной трубе —

$$\frac{p}{\rho g} = H_2 + \frac{l_2}{g} \cdot \frac{dv_n}{dt}, \quad (2)$$

где обозначения общезвестны.

Для определения связи v_n , v_n и p воспользуемся уравнением неразрывности:

$$(\omega_1 v_n - \omega_2 v_n) dt = -dW, \quad (3)$$

где dW — изменение объема воздуха в воздушном колпаке.

Процесс сжатия воздуха в колпаке принимаем адиабатным, ибо он происходит очень быстро, поэтому:

$$W_0 p_0^{\frac{1}{k}} = W p^{\frac{1}{k}}. \quad (4)$$

Из уравнений (2) — (4) имеем:

$$\frac{1}{k} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{k}} \frac{W_0 (p - \rho g H_1)}{p} dp = \rho l_1 (\omega_1 v_1 - \omega_2 v_2) dv_2, \quad (5)$$

и

$$H_2 = H_1 + \frac{l_2}{g} \frac{dv_2}{dt} - \frac{l_1}{g} \frac{dv_1}{dt}. \quad (6)$$

Уравнение (6) после интегрирования при условии $t = 0, v_1 = v_2, v_{1i} = v_{2i}$ имеет вид:

$$v_2 = \frac{g(H_1 - H_2)}{l_2} t + \frac{l_1}{l_2} v_1 + v_{cp} - \frac{l_1}{l_2} v_{1i}. \quad (7)$$

Уравнение (5) после подстановки (7) можно интегрировать, если известна зависимость t от v_2 . С этой целью используем решение Л. Бержерона [1], согласно которому:

$$t = \frac{2l_1}{v_{0.06}(1 + \zeta_c)} \left[\arctg \frac{v_2}{v_{0.06}} - \arctg \frac{v_{1i}}{v_{0.06}} \right], \quad (8)$$

где $v_{0.06}$ — установившаяся скорость при обратном движении жидкости из воздушного колпака в питательную трубу; v_1 — скорость жидкости в питательной трубе, при которой ударный клапан захлопывается [3].

Втекание жидкости в колпак прекращается при $\omega_1 v_1 = \omega_2 v_{cp}$, чему соответствует максимально сжатое состояние воздуха. Здесь v_{cp} — средняя скорость жидкости в нагнетательном трубопроводе. Интегрируя уравнение (5) с учетом (6) и (7) и обозначив давление в колпаке при $v_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ через p_{max} окончательно получим:

$$W_0 = \frac{\rho l_1 \left[\frac{1}{2} \omega_1 v_1 + \left(\frac{1}{2} \omega_2 - \frac{1}{2} \frac{\omega_2^2}{\omega_1} \cdot \frac{l_1}{l_2} - \frac{\omega_2^2}{\omega_1} \right) v_{cp} \right] \left(v_1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} v_{cp} \right)}{\frac{p_0}{k-1} \left[\left(\frac{p_0}{p_{max}} \right)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right] - \rho g H_1 + \rho g H_1 \left(\frac{p_0}{p_{max}} \right)^{\frac{1}{k}}}. \quad (9)$$

Из уравнения (9) можно получить объем воздушного колпака при гидравлическом ударе в простом трубопроводе, рассмотренного в [5].

В случае, когда нет необходимости учитывать инерцию массы жидкости, заключенной в нагнетательном трубопроводе, получим более простую формулу:

$$W_0 = \frac{\rho l_1 \omega_1 \left[\frac{q}{\sqrt{2} \omega_1} - \frac{v_1}{\sqrt{2}} \right]}{\frac{\rho_0}{k-1} \left[\left(\frac{\rho_0}{\rho_{\max}} \right)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right] - \rho g H_1 + \rho g H_1 \left(\frac{\rho_0}{\rho_{\max}} \right)^{\frac{1}{k}}}, \quad (10)$$

где q — производительность таранной установки.

В случае изотермического процесса сжатия воздуха в воздушном колпаке аналогичным образом получаем:

а) в случае учета параметром нагнетательного трубопровода —

$$W_0 = \frac{\rho l_1 \left[\frac{1}{2} \omega_1 v_1 + \left(\frac{1}{2} \omega_2 - \frac{1}{2} \frac{\omega_2^2}{\omega_1} \cdot \frac{l_1}{l_2} - \frac{\omega_2^2}{\omega_1} \right) v_{cp} \right] \left(v_1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} v_{cp} \right)}{\rho_0 \ln \frac{\rho_{\max}}{\rho_0} + \frac{\rho g H_1 \rho_0}{\rho_{\max}} - \rho g H_1}, \quad (11)$$

б) в случае их неучета —

$$W_0 = \frac{\rho l_1 \omega_1 \left[\frac{q}{\sqrt{2} \omega_1} - \frac{v_1}{\sqrt{2}} \right]^2}{\rho_0 \ln \frac{\rho_{\max}}{\rho_0} + \frac{\rho g H_1 \rho_0}{\rho_{\max}} - \rho g H_1}. \quad (12)$$

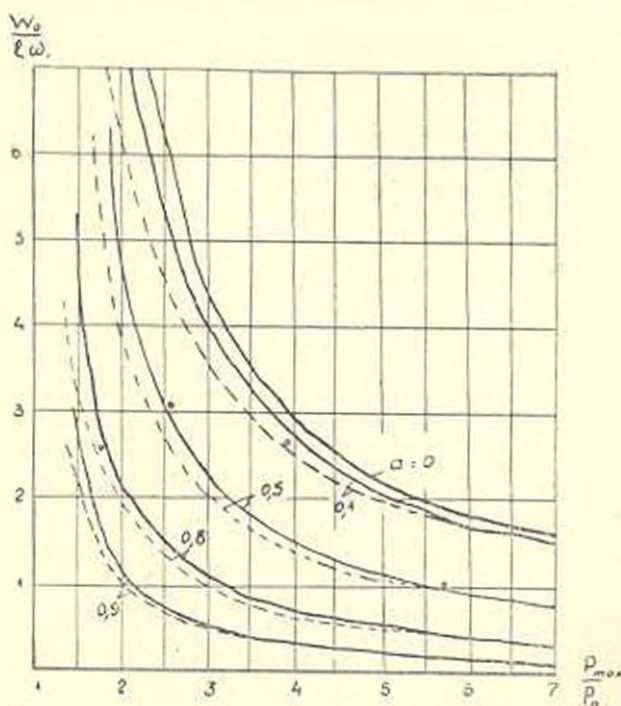


Рис. 3. Зависимость относительного объема $\frac{W_0}{\xi \omega_1}$ воздушного колпака гидротарана от относительного давления $\rho_{\max}/\rho_0$ при различных значениях $a = q/\omega_1 v_n$: — при адиабатическом процессе сжатия воздуха; - - - при изотермическом процессе сжатия.

Из формул (9) и (11) видно, что объем воздушного колпака находится в прямой зависимости от объема питательной грубы. Размеры нагнетательного трубопровода также являются параметрами, определяющими объем воздушного колпака, что не учитывалось в существующих формулах. Поэтому имеющиеся формулы обеспечивают достоверные результаты лишь при небольших размерах нагнетательного трубопровода.

На рис. 3 в относительных координатах построена зависимость $\frac{W_0}{I_{1, \text{max}}}$ от $\frac{p_{\text{max}}}{p_0}$ при $v_1 = 0,58 \text{ м/с}$, $H_1 = 10 \text{ м}$ и при различных значениях $a = q/v_1 \omega_1$ для изотермического и адиабатического процессов сжатия воздуха. На этих же графиках нанесены результаты опытов, откуда видно хорошее совпадение с теоретическими кривыми.

ЕрПИ им. К. Маркса

11. V. 1981

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Bergeron L.* Machines hydrauliques. — Paris, 1928, с. 61—105.
2. Чистопольский С. Д. Гидравлические тараны. — М.—Л.: ОНТИ, 1936. — 151 с.
3. Овсепян В. М. Гидравлический таран и таранные установки. — М.: Машиностроение, 1968. — 124 с.
4. Овсепян В. М. Определение объема воздушного колпака гидравлического тарана. — В сб.: Труды ЕрПИ, сер. Строительство и архитектура, 1969, т. 23, с. 137—140.
5. Маркарян А. Я. Исследование гидравлического удара с разрывом сплошности потока в трубопроводах насосных станций и некоторые меры борьбы. — Дис. канд. тех. наук. — Ереван, 1973. — 132 с.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Н. П. ЩЕРБАКОВ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ МЕЖДУ ТЕХНОЛОГОМ И ЭВМ
 ПРИ ПОДГОТОВКЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ
 ДЛЯ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Практика подготовки управляющих программ (УП) для токарных станков с ЧПУ показала необходимость более тесного взаимодействия между технологом и ЭВМ. Высокий уровень развития вычислительной техники, внедрение ЕС ЭВМ и автоматизированных рабочих мест проектировщика (АРМ) требуют создания новой технологии подготовки УП, основанной на оптимальном распределении функций между технологом и ЭВМ и позволяющей вести подготовку УП при непосредственном участии технолога в диалоговом режиме.

Практические трудности в постановке и решении задачи оптимального распределения функций связаны прежде всего с необходимостью их количественного и качественного выражения, подлежащих распределению в системе подготовки УП. Решение этой задачи, в свою очередь, позволяет ответить на вопрос о поиске наиболее подходящей и универсальной количественной и качественной оценки, способной однозначно охарактеризовать принятое распределение функций или принятую степень автоматизации процесса подготовки УП.

Задача количественного выражения общего объема функций, подлежащих распределению при подготовке УП, может быть сформулирована как задача определения количества информации $A(T)$, необходимой и достаточной для получения, контроля и управления процессом подготовки УП с заданной точностью, качеством и надежностью. Условимся, что решение всех задач, возникающих при подготовке УП, должно происходить за минимальный определенный промежуток времени $0 < t \leq T$.

Пусть $A_T(T)$, $A_A(T)$ — задачи, решаемые технологом в процессе подготовки УП и на ЭВМ. Тогда естественно, что

$$A(T) = A_T(T) + A_A(T). \quad (1)$$

Количественная оценка степени автоматизации может быть представлена следующим выражением:

$$A_A = \frac{A_A(T)}{A_A(T) + A_T(T)} = \frac{A_A(T)}{A(T)}. \quad (2)$$

Из (2) очевидно, что $0 \leq K_s \leq 1$. При $A_r(T) = 0$ степень автоматизации имеет максимальное значение: $K_s = 1$, а это значит, что имеет место автоматический режим подготовки УП. Другой крайний случай $A_s(T) = 0$ соответствует равенству $K_s = 0$, когда все задачи в системе решаются технологом вручную без участия ЭВМ, т. е. имеет место неавтоматизированный способ подготовки УП.

Из (1) и (2) следует также, что

$$A_p(T) = K_s A(T), \quad A_r(T) = (1 - K_s) A(T). \quad (3)$$

Соотношения (3) позволяют точно сформулировать и однозначно решить задачу распределения функций в системе по заданной приемлемой ее степени автоматизации, количественным и качественным характеристикам процесса подготовки УП.

Таким образом, если имеется возможность выбрать значение K оптимальным в каком-либо смысле, то из выражения (3) получаем соответствующее оптимальное решение задачи распределения функций.

Теперь остановимся на определении оптимальной степени автоматизации процесса подготовки УП. Можно предложить три способа определения K_s по критерию: а) минимальной стоимости подготовки УП; б) максимальной надежности подготовки УП и в) максимальной надежности процесса подготовки УП на единицу его стоимости.

Имея функции $f_1(A_s)$ и $f_2(A_r)$, выражающие стоимости автоматической обработки единицы информации в зависимости от общего количества информации A_s и A_r при $0 < t \leq T$, стоимость процесса подготовки УП можно определить выражением

$$C = f_1(A_s) A_s + f_2(A_r) A_r. \quad (4)$$

С учетом (3) выражение (4) примет вид:

$$C = F(K_s, A, T) = f_1(K_s, A) K_s A + f_2[(1 - K_s) A] (1 - K_s) A. \quad (5)$$

Оптимальная с точки зрения минимальной стоимости подготовки УП степень автоматизации должна удовлетворять условиям:

$$\frac{dF(K_s, A, T)}{dK_s} = 0; \quad \frac{d^2F(K_s, A, T)}{dK_s^2} > 0. \quad (6)$$

Аналогичным образом может быть получено оптимальное значение K_s по критерию максимальной надежности процесса подготовки УП. При этом исходными данными являются функции: $P(A, T)$ — вероятность того, что система подготовки УП, включая ЭВМ и технолога, обеспечит решение всех задач A , необходимых и достаточных для подготовки УП при $0 < t \leq T$ с заданной точностью и качеством; $P_s(A_s, T)$ и $P_r(A_r, T)$ — вероятности правильного решения за время T задач A_s и A_r .

После несложных преобразований и учитывая (3), получим следующее выражение, которое определяет оптимальное значение K_s , максимизирующее надежность подготовки УП:

$$\frac{dP(K_s, A, T)}{dK_s} = 0, \quad \frac{d^2P(K_s, A, T)}{dK_s^2} < 0. \quad (7)$$

На основе вышесказанных рассуждений может быть сформулировано универсальное выражение, соответствующее критерию максимума надежности подготовки УП:

$$N(K_s, A, T) = \frac{P(K_s, A, T)}{F(K_s, A, T)}. \quad (8)$$

Подставляя в (8) развернутые выражения для P и F , получаем:

$$N(K_s, A, T) = \frac{P_s(K_s, A, T) P_r[(1 - K_s) A, T]}{f_1(K_s, A) K_s A + f_2[(1 - K_s) A] (1 - K_s)} \quad (9)$$

Используя обычные условия максимума функции N по аргументу K_s , находим оптимальное значение степени автоматизации в виде:

$$K_s = \frac{B(K_s) R(K_s) - M^2 \frac{d}{dK_s} \left[\frac{B(K_s)}{M(K_s)} \right]}{R^2(K_s) \frac{d}{dK_s} \left[\frac{B(K_s)}{R(K_s)} \right]} \quad (10)$$

где

$$B(K_s) = P_s(K_s A, T) P_r[(1 - K_s) A, T];$$

$$R(K_s) = f_1(K_s A, T) - f_2[(1 - K_s) A, T]; \quad M(K_s) = f_2[(1 - K_s) A, T].$$

Проведенные экспериментальные исследования позволили найти функции $f_1(A_s)$, $f_2(A_r)$ и $P_s(A_s, T)$, $P_r(A_r, T)$ практически для всех решаемых задач при подготовке УП на различные детали типа тел вращения, обработка которых осуществляется на токарных станках с ЧПУ. В результате составлены программы расчета K_s на ЭВМ, что позволило исключить необоснованность выбора способа подготовки УП, снизить стоимость, повысить надежность и качествоготавливаемых УП.

Ի Ն Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

Մ Ե Ք Ն Ն Ա Շ Ի Ն Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

- Վ. Ի. Խովյակով. 2. Վ. Դաքադյան: Հայն ունիվերսալ կոնսոլ-ֆրեզերային հաստացի
կրող համակարգի պարամետրային օպտիմալացումը «ЛП-НОМЕСК» նշանակով
Վ. Մ. Թախչյան: Երջանային փոխակերպիչների հետազոտման վերաբերյալ .

Շ Ի Ն Ա Ր Ա Ր Ա Կ Ա Ն Մ Ն Ե Ա Ն Ի Ո Ա

- Ի. Վ. Հովհաննիսյան, 2. Ն. Սարգսյան: Փոփոխական հաստաթյամբ շերտի ազդեցու-
թյունը տարածվող հարթ սեյսմիկական ալիքի ինտենսիվության վրա .

Է Լ Ն Կ Տ Ր Ա Տ Ն Ն Ն Ի Կ Ա

- Ե. Ա. Մանուկյան, Վ. Բ. Ներսիսյան: Օդային բաղադրվ մորկա-հոսանքային հաստա-
թյան չափիչի տեսական հարցերը և զորոնական կիրառումը

Հ Ա Շ Վ Ո Ղ Ա Կ Ա Ն Տ Ն Ե Ն Ի Ա

- Վ. Կ. Բառլոյան: Ոչ զծային մարկոպյան դեկավարելի համակարգի սինթեզը վիճակագրա-
կան դժայնացման մեթոդով

Հ Ի Դ Ր Ա Վ Լ Ի Կ Ա

- Ս. Ն. Ենգիբարյան, Պ. Ի. Կոստանյան, Կ. Ս. Թամանյան, Ի. Մ. Կակոյան: Ջերմանյու-
թափոխանցման և փոշեկորզման պրոցեսների համար կիրառվող՝ սահմանված
և կարգավորվող մակերեսով ափսեներ
Է. Պ. Աշխիանց: Հետադարձ փոխանում սկավառակի անցքերի մակերեսների հաշվարկը
հիդրավիկական հարվածի էֆեկտով մարման նպատակով

Դ Ի Տ Ա Կ Ա Ն Ն Ո Ւ Թ Ե Ր

- Ա. Ա. Սառուխանյան: Հիդրոտարանի օդային խցիկի հաշվարկը
Ն. Պ. Ենիբարյան: Տեխնոլոգի և էՄ-ի միջև ֆունկցիաների բաշխումը թվային ծրագրա-
վորմամբ կառավարվող խառատային հաստոցների կառավարման ծրագրերի
նախապատրաստման ժամանակ

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- В. С. Хомяков, О. В. Дабалян.* Параметрическая оптимизация несущей системы широкоуниверсального консольно-фрезерного станка на основа ЛП-поиска. 3
- В. М. Таирян.* К исследованию круговых преобразователей 11

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

- М. В. Оганесян, А. Е. Саргсян.* Влияние переменной толщины слоя на интенсивность распространяющихся плоских сейсмических волн 16

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Е. С. Манукян, В. Б. Персесян.* Вопросы теории и практического применения щелевого вихретокового измерителя толщины 22

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- В. К. Бругян.* Синтез нелинейных марковских управляемых систем методом статистической аппроксимации 29

ГИДРАВЛИКА

- С. Н. Енгибарян, П. И. Костанян, К. С. Тамалян, Ж. М. Какоян.* Провальные тарелки с фиксированной и регулируемой площадью провала для тепло-массообменных и пылеулавливающих процессов 36
- Э. П. Ацилянц.* Расчет площади отверстий в тарелки обратного клапана с целью эффективного гашения гидравлического удара 41

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

- А. А. Сарухян.* Расчет воздушного колпака гидротарана 46
- Н. П. Щербаков.* Распределение функций между технологом и ЭВМ при подготовке управляющих программ для токарных станков с ЧПУ 51