

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Издаётся с 1947 г.

ԽՐԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈՒՆԿԻՈՒ

Գրքային Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Աղոնց Հ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղակալ), Ալեքսեյանի
Վ. Վ., Անանյան Ա. Կ., Գրքային Տ. Ա., Զարգյան Մ. Ա., Նազարով Ա. Գ., ՏԼԻ-Ազատի Ի. Ա.,
Փրեանյան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ)
Պատասխանատու քարտուղար Ստեփանյան Զ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Касьян М. В. (ответ. редактор) Аюня Г. Т. (зам. ответ. редактора), Алексеевский
В. В., Аминян А. К., Гороян Т. А., Задоян А. А., Назаров А. Г., Пинафоян В. В. (зам.
ответ. редактор), Тер-Азарьев Н. А.
Ответственный секретарь Степанян З. К.

Խմբագրության հասցեն՝ Երևան—19, Բարեկամության փող. 24գ

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



ЭНЕРГЕТИКА

С. Т. АДОНИС Р. М. ГАБРИЕЛЯН

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОЙ ПЕРЕНУМЕРАЦИИ
УЗЛОВ СХЕМЫ ПРИ ЕЕ ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИИ

В целом ряде задач, связанных с расчетами статической и динамической устойчивости, разбиением сложной схемы на подсхемы, оптимизацией режимов с учетом потерь в схеме и др., требуется предварительно преобразовать открытую схему в эквивалентированный многополюсник. Особенно актуальной является задача эквивалентирования при расчете потерь мощности и энергии в электрических сетях, содержащих несколько сот узлов. Существующие алгоритмы эквивалентирования не удовлетворяют условиям оптимальности, а именно: решение задачи эквивалентирования с использованием минимальной оперативной памяти ЦВМ.

Машинные эксперименты, выполненные при замене схемы из 46 узлов эквивалентным многополюсником с 28 независимыми узлами, показали, что продолжительность расчета и число ячеек оперативной памяти ЦВМ, занимаемых в процессе эквивалентирования, зависят от очередности выбора эквивалентлируемых узлов. Так, например, при трех различных способах выбора очередности узлов потребовалось соответственно 128; 162; 264 ячейки оперативной памяти, не считая ячеек, занимаемых параметрами полученного эквивалентного многополюсника. Указанные три способа отличались друг от друга порядком нумерации открытой схемы. Таким образом, возникла задача отыскания такого способа перенумерации узлов, при котором обеспечивается минимальное число ячеек оперативной памяти ЦВМ для хранения промежуточной информации при эквивалентировании. Необходимость перенумерации узлов схемы ранее была указана в [1].

О значении перенумерации узлов указано также в [2] в связи с задачей оптимального метода решения уравнений со слабозаполненными матрицами.

Постановка задачи. Принимается в качестве заданных:

- а) открытая схема $n + p$ узлов;
- б) параметры $R_{m,k}$ и $b_{m,k}$ ветвей схемы, где m, k — индексы узлов схемы.

Требуется определить последовательность номеров узлов, согласно которой при эквивалентировании обеспечивается выделение минимума ячеек оперативной памяти для хранения промежуточной информации.

Сформулированную задачу целесообразно назвать оптимальной перенумерацией узлов, как связанную с эквивалентированием открытых схем электрических систем.

Цель статьи — разработка алгоритма и программы оптимальной перенумерации узлов схемы при ее эквивалентировании.

Алгоритм содержит следующие процедуры:

а) нумерация узлов схемы. Нумеруются сначала генерирующие и нагрузочные узлы с суммарным числом n , а затем сетевые (p) узлы, которые подлежат перенумерации;

б) сетевые (p) узлы нумеруются по порядку возрастания числа связей (при равном числе связей нескольких узлов произвольно выбирается один из них);

в) вершины трехлучевых звезд с конечным числом i , представляющие поперечную емкость относительно земли, в перенумерации не участвуют, принимая порядковые номера исходной схемы $n + p$, $n + p - 1$, $n + p - 2$, ..., $n + p - i$.

Этим уменьшаются затраты машинного времени при перенумерации в целом;

г) на каждом i -ом шагу эквивалентирования [3, 4] отбрасывается из схемы замещения тот узел, у которого есть наименьшие связи с остальными узлами, присваивая ему $(n + p - i + 1)$ -ый номер, с тем, чтобы число вновь образующихся ветвей на i -ом шаге получилось наименьшим;

д) при равном числе связей нескольких узлов на i -ом шаге произвольно выбирается один из них.

Схема приведена на рис. 1, где $n=28$, $p=18$. Узлы за №№ 29÷46 занумерованы тремя способами: I — случайная нумерация, II — оптимальная перенумерация, III — неоптимальная перенумерация.

В табл. 1 приведены варианты случайной, оптимальной и неоптимальной нумераций узлов схемы рис. 1, где перенумерованы узлы за №№ 29÷46.

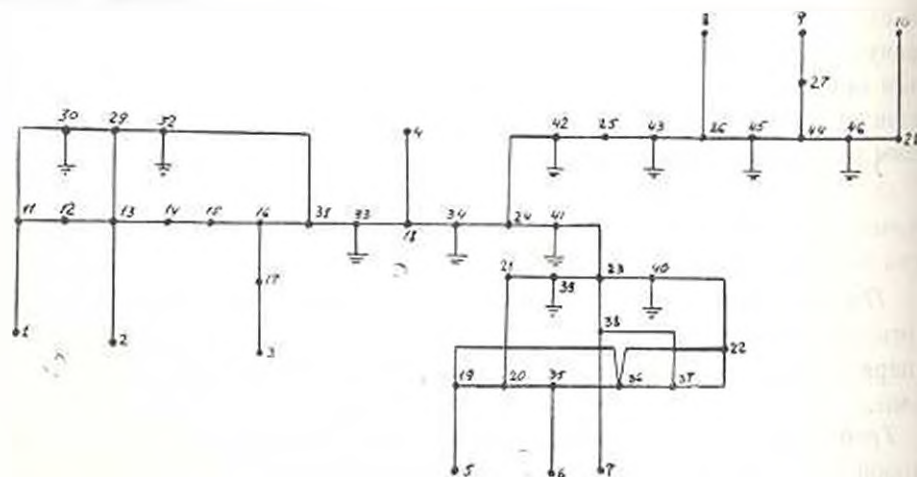


Рис. 1

Таблица 1

Варианты	Узлы																							
I—случайная нумерация	29	30	31	32	33	34	35	35	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46						
II—оптимальная нумерация	30	35	34	33	32	31	29	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36						
III—неоптимальная нумерация	46	4	3	36	42	43	45	30	31	32	29	33	34	41	40	35	37	38						

Доказательство оптимальности перенумерации. Для доказательства того, что указанный алгоритм обеспечивает оптимальное решение поставленной задачи, были выполнены эквивалентирования по второму и третьему способам.

Примером оптимальной перенумерации является II вариант (табл. 1), при котором полученная промежуточная информация при эквивалентировании приведена в табл. 2.

Таблица 2

Узлы	В е т в и																							
m	28	26	18	11	33	7	23	11	13	11	6	20	19	6	20	19	6	22	6	6	6	22	19	
k	32	32	33	34	34	29	29	33	33	13	30	30	20	20	29	29	29	29	19	22	20	23	22	

III вариант является неоптимальным (максимальная промежуточная информация). Данные этого варианта приведены в таблице 3.

Таблица 3

Узлы	В е т в и																							
1	2																							
m	19	19	22	22	43	22	19	43	19	22	19	7	19	19	22	23	22	7	19	19	7	27	27	40
k	43	45	43	45	45	43	43	44	22	44	44	43	22	43	43	43	23	23	23	20	22	40	11	41

Продолжение таблицы 3

1	2																							
m	36	13	13	11	19	7	13	13	11	16	11	11	11	13	22									
k	37	37	36	36	22	19	36	35	13	35	35	16	13	16	23									

I вариант представляет эквивалентирование при случайной нумерации узлов (промежуточная информация приведена в табл. 4).

Таблица 4

Узлы	В е т в и																												
m	28	26	22	7	7	23	23	7	7	7	22	22	22	7	7	7	19	19	19	22	22	23	19	18	29	16	18	11	
k	44	44	23	23	37	37	36	22	23	36	23	36	23	19	22	23	35	22	23	35	23	35	35	20	31	31	29	29	29

Программа оптимальной перенумерации, составленная в соответствии [5] на языке «Фортран-4», приводится в приложении.

Выводы

1. Предлагаемый алгоритм перенумерации узлов открытой схемы для ее замены схемой эквивалентного многополюсника основан на принципе использования минимума ячеек оперативной памяти ЭВМ.

2. Для доказательства оптимальности перенумерации выполнены примеры расчета для одной и той же схемы при оптимальной, неоптимальной и случайной нумерации узлов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Подпрограмма NODE

Назначение. Перенумерация сетевых узлов электрической системы, обеспечивающая оптимальную промежуточную информацию при эквивалентировании.

Обращение

CALL NODE (JT, NB, NYC, NMN, J, LL, L, LK, L4, LT, LJ)

Описание параметров

В массивах M, K и M1, K1 хранятся номера узлов попарно образующихся ветвей схемы.

В массиве M2 производится выбор вновь образующихся ветвей на каждом шагу эквивалентирования.

JT—длина массивов M, K, M1, K1, M2;

NB—число элементов в массивах M, K

NYC—число узлов исходной схемы;

NMN—число пар полюсов эквивалентного многополюсника;

L, LL, LK—переменные, начальные значения которых равны нулю;

L4—положительное большое число;

LT=19 (для задачи рис. 1);

LJ=18 (для задачи рис. 1).

SUBROUTINE NODE (JT, NB, NYC, NMN, J, LL, L, LK, L4, LT, LJ)

DIMENSION M(JT), K(JT), M1(JT), K1(JT), M2(JT)

2	FORMAT (2I5)	24	DO 28I=1, L
c	1		IF(M(I)—L2) 26, 25, 26
	DO 19I=1, NB	25	L1=L1+1
19	READ 2, M1(I), K1(I)		GO TO 28
c	2	26	IF(K(I)—L2) 28, 27, 28
	DO 22I=1, NB	27	L1=L1+1
	IF(M1(I)—NMN) 20, 20, 21	28	CONTINUE
20	IF(K1(I)—NMN) 22, 22, 21		IF(L1) 23, 23, 723
21	L=L+1	723	IF(L1—L4) 29, 29, 23
	M(L)=M1(I)	29	L4=L1
	K(L)=K1(I)		L3=L2
22	CONTINUE		GO TO 23
c	3	30	J=J+1
	NB1=L		NYC=J+1
123	LL=LL+1		IF(J*EQ*J)L3=30
	L2=NYC+1		WRITE 2, J1, L3
	L=NB1	c	4
	IF(LL—LT) 23, 52, 52		L4=L4+1
23	L1=0		J2=0
	L2=L2+1		DO 34I=1, NB1
	IF(L2—NMN) 24, 30, 24		

1F(K(1)—L3) 32, 31, 32	c	5
31 J2=J2+1		NC=((1-NC) * NC) 2
M2(J2)=M(1)		IK=0
GO TO 34		NTT=0
32 IF(M(1)—L3) 34, 33, 34	35	IK=IK+1
33 J2=J2+1		II=IK+1
M2(J2)=K(1)		DO 37JK II, J2
34 CONTINUE		IF(NTT * EQ * NC)GO TO 123
DO 41IT=1, L		NTT=NTT+1
38 IF(M(IT)) 39, 42, 39		NB1=NB1+1
39 IF (M(IT)—L3) 41, 40, 41		M(NB1)=M2(IK)
40 M(IT)=M(NB1)		K(NB1)=M2(JK)
K(IT)=K(NB1)		DO 342 II=1, L
M(NB1)=0		IF(M(II)—M(NB1)) 342, 340, 342
NB1=NB1+1	340	IF (K(II)—K(NB1)) 342, 341, 342
GO TO 38	341	NB1=NB1+1
41 CONTINUE		GO TO 37
42 L=NBI	342	CONTINUE
DO 241IT=1, L		DO 442 II=1, L
238 IF(M(IT)) 239, 242, 239		IF(K(II)—M(NB1)) 442, 440, 442
239 IF(K(IT)—L3) 241, 240, 241	440	IF(M(II)—K(NB1)) 442, 441, 442
240 M(IT)=M(NB1)	441	NB1=NBI+1
K(IT)=K(NB1)		GO TO 37
M(NB1)=0	442	CONTINUE
NB1=NBI+1	37	CONTINUE
GO TO 238		GO TO 35
241 CONTINUE	52	RETURN
NC=J2-1		END
L=NBI		

Требуемые функции и подпрограммы

Подпрограммы не требуется

Метод:

Перенумерация узлов производится неиндексно.

Перевод комментариев в тексте

1. Ввод данных.
2. Выбор элементов из массивов M1, K1, участвующих в эквивалентировании и их запись в массивы M2, K2.
3. Расчет и печать номера эквивалентированного узла (J1) и номера, которым он должен стать (L3), чтобы обеспечить минимум информации на k-ом шагу эквивалентирования.
4. Организация эквивалентирования.
5. NC—число вновь образующихся ветвей на каждом шагу эквивалентирования.

АрмИИИЭ

Поступило 31.V 1976.

Հ. Տ. ԱՊՈՆՅ, Ռ. Մ. ԳԱՐՐԻՆԵՅԱՆ

ՍՆՆՍՄԱՅԻ ՀԱՄԱՐԺԵՐԱՎՈՐՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ ՆՐԱ ՀԱՆԳՈՒՅՑՑՆԵՐԻ
ՕԳՏԻՐԱՆՆ ԳԵՐԱՀԱՄԱՐԱԿԱՎՈՐԱՆ ԱՎԳՐԻԹՄ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Փ

Ետևադրված է բաց սխեման համարժեք բազմաբևեռի սխեմայով փոխարինելու նպատակով բաց սխեմայի հանդույցների վերահամարակալման

ալգորիթմ, որը հիմնված է թվային հաշվիչ մեքենայի օպերատիվ հիշողության բջիջների մինիմալ օգտագործման վրա: Վերահամարակալման օպտիմալությունն ապացուցելու նպատակով միեևույն սխեմայի համար կատարված են հաշվարկներ հանգույցների օպտիմալ, ոչ օպտիմալ և պատահական համարակալումների ժամանակ:

ЛИТЕРАТУРА

1. Галля А. Р. О нумерации узлов при расчетах установившихся режимов электрических систем методом Ньютона-Рафсона. «Электричество», № 2, 1970.
2. Макаров В. М. Эффективность применения точных методов линейной алгебры в расчетах потокораспределения многомерных электрических сетей. Сб. Тезисы докладов «Исследование решения на ЦВМ уравнений установившегося режима электрических систем». 1976.
3. Адоин Г. Т., Юзбашин А. М., Галля А. С. К исследованию трех способов обращения матрицы комплексной проводимости электрических схем. «Известия АН АрмССР (серия техн. наук)», т. XXVI, № 6, 1973.
4. Коробчук К. В., Коваль А. Ю. Расчет установившихся электрических режимов при анализе статической устойчивости сложной энергосистемы. Сб. «Проблемы технической электродинамики», № 30, 1971.
5. Сборник научных программ на Фортране. Вып. I (перевод с англ.). Изд. «Статистика», 1974.

ЭНЕРГЕТИКА

А. А. АРУТЮНЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЭКВИВАЛЕНТНОГО
МНОГОПОЛЮСНИКА И ПЕРЕСЧЕТ МАТРИЦЫ УЗЛОВЫХ
ПРОВОДИМОСТЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ В ИСХОДНОЙ СХЕМЕ

В расчетах режимов электроэнергетических систем получает все большее распространение представление схем эквивалентными многополюсниками [1]. Преимущества метода многополюсника заключается в том, что взамен итерационного расчета режимов открытых схем с N узлами в итерацию вовлекаются только M уравнений эквивалентного многополюсника, режим оставшихся $C = N - M$ узлов определяются без итерации по данным расчетов режимов M узлов многополюсника. Исследования, проведенные в АрмИНИЭ, показали лучшую сходимость расчетов режимов электрических систем, схемы которых были представлены эквивалентными многополюсниками.

В [1-7] и в ряде других работ успешно применяется метод эквивалентирования исходной схемы путем последовательного исключения узлов по формуле

$$Y_{mk} = \frac{Y_{mc} Y_{kc}}{Y_{cc}}, \quad (1)$$

где c — номер исключаемого узла; Y_{mk} — проводимость ветвей m, k ; Y_{cc} — собственная проводимость исключаемого узла.

При реализации данной методики на ЦВМ для расчетов установившихся режимов больших электрических систем, учитывая, что напряжения $\dot{U}$ сетевых (исключенных) узлов определяются по следам эквивалентирования, имея при этом режим эквивалентной схемы, возникают следующие трудности:

1. Оптимальное распределение памяти ЦВМ;
2. Повторное эквивалентирование при изменениях в схеме, т. е. из-за подключения или отключения отдельных элементов сети.

В данной статье предложены методы преодоления этих трудностей.

1. Определение структуры эквивалентного многополюсника для оптимального распределения памяти ЦВМ при расчетах установившихся режимов электрических систем

Нумерация узлов исходной схемы производится в следующем порядке:

$1 \div \Gamma$ — генераторные узлы;

$\Gamma + 1 \div N1$ — нагрузочные узлы;

$N1 + 1 \div N$ — сетевые (исключаемые) узлы.

Постановка задачи. Дано: N — число узлов исходной схемы; MK — число ветвей исходной схемы, $N1$ — число узлов эквивалентной схемы; $m-k$ — связи исходной схемы.

Требуется определить: $MKЭ$ — количество ветвей эквивалентной схемы (число ненулевых элементов эквивалентной матрицы); $m-k$ — связи эквивалентной схемы; $MКС$ — количество связей следов эквивалентирования; $mс-kс$ — связи следов эквивалентирования.

Следы эквивалентирования — это связи в каждом этапе эквивалентирования с исключаемым узлом.

Для определения вновь образующихся ветвей вначале выбираются узлы, связанные с исключенным узлом C , затем производится переупорядочение узлов в порядке возрастания с целью сохранения условия $m < k$, характерного для треугольной матрицы. После этого образуются новые ветви, число которых определяется сочетанием C_n^m , где n — число узлов, связанных с исключаемым узлом. Эта процедура исключения повторяется до тех пор, пока будет соблюдаться условие $C = N1$. Блок-схема программы, реализующей данный алгоритм и составленная на языке „Фортран-4“, приведена на рис. 1.

Число элементов эквивалентной схемы $MKЭ$ и следов эквивалентирования $MКС$ используется в качестве размерности для массивов соответствующих индексов и проводимостей.

2. Пересчет матрицы узловых проводимостей эквивалентного многополюсника при изменении в исходной схеме

При расчетах установившихся режимов с предварительным эквивалентированием исходной схемы часто одна и та же схема несколько раз эквивалентруется из-за изменений в исходной схеме. На это тратится значительное машинное время, поэтому целесообразно производить пересчет только измененных элементов матрицы. Предлагаемый алгоритм дает возможность выполнить пересчет эквивалентной матрицы по той же программе эквивалентирования, реализующей формулу (1) с незначительными изменениями, не влияющими на основную программу.

Постановка задачи. Даны: ветви со связями $m-k$ и сопротивлениями $Z_{mk} = r_{mk} + jx_{mk}$ участка схемы, где произведено изменение; исходная эквивалентная матрица (ИЭМ), которая из внешней памяти вызвана на оперативную память ЦВМ.

Требуется пересчитать ИЭМ, учитывая вносимые изменения в исходной схеме. Для этого выбирается участок на той части схемы, где внесено изменение, имея в виду подключение или отключение отдельных элементов сети (рис. 2, а). При этом граничные узлы участка долж-

ны принадлежать к множеству узлов, которые остаются после эквивалентирования, и охватить ветви со всех сторон.

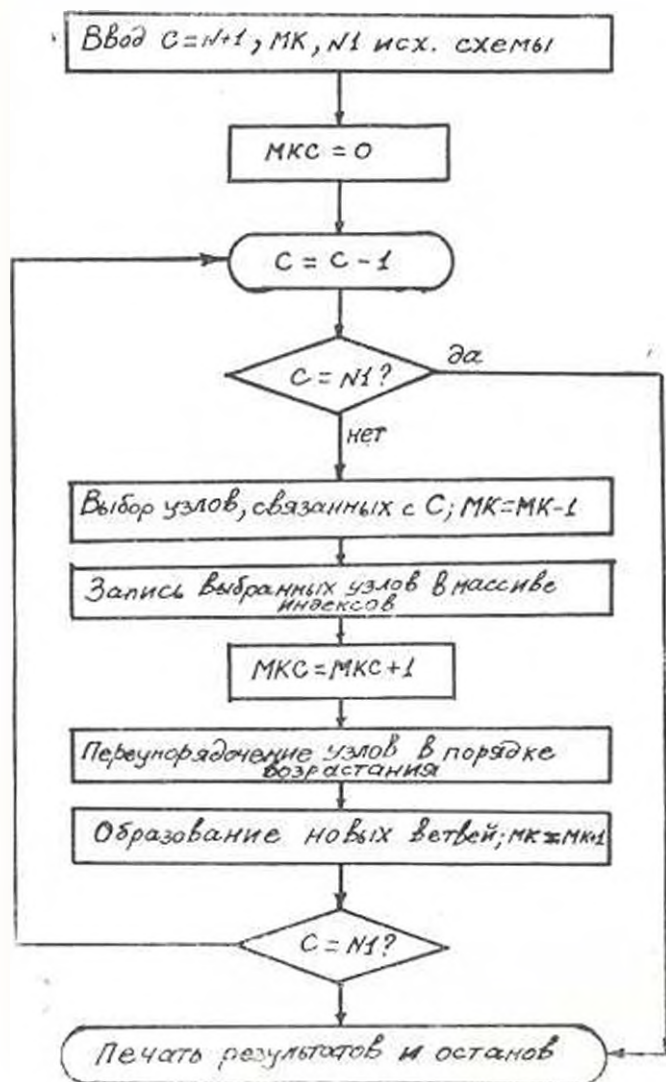


Рис. 1

Узлы, представляющие подключаемую или отключаемую ветвь $i-j$, могут принять значения:

- а) $i \in M; j \in M$;
- б) $i \in M; j \notin M$;
- в) $i \notin M; j \in M$;

где M —множество узлов, которые остаются после эквивалентирования.

Более общим является случай в), что и рассмотрено в блок-схеме программы, реализующей формулу (1) и предлагаемый алгоритм пересчета ИЭМ при изменении в исходной схеме (рис. 3), где NB — число ветвей участка; $N2$ — число исключаемых узлов, которые записаны в массиве K_i .

При $N2=0$ действует только программа эквивалентирования. Остальные обозначения на блок-схеме имеют значения, принятые выше.

Исключение узлов производится в том порядке, в каком их номера записаны в массиве K_i . После завершения процедуры исключения узлов новые значения элементов записываются на соответствующих местах в ИЭМ. В случае подключения новых линий могут образоваться такие связи, которых нет в ИЭМ, тогда эти новые элементы записываются в конце соответствующих массивов-связей и проводимостей. При отключении линий происходит обратное, ряд связей могут не образоваться, тогда эти элементы стираются в ИЭМ.

Пересчет значений собственных проводимостей (диагональных элементов ИЭМ) граничных узлов (50; 60; 80 на рис. 2,а) производится по следующей формуле:

$$Y_{rr} = Y'_{rr} + \sum_{k=1}^n Y_{rk} - Y_{rk}, \quad (2)$$

где Y'_{rr} — собственная проводимость граничного узла участка;

Y_{rk} — взаимная проводимость между граничным узлом и узлами, не входящими в участок.

Формулу (2) можно не включать в программу, если в участок включены также связи $r-k$.

Предложенные алгоритмы были применены в расчетах установившихся режимов с целью определения структуры потерь энергии в электрических сетях Армянской энергосистемы. Расчеты показали эффективность оптимального распределения оперативной памяти ЦВМ и пересчета ИЭМ при изменении в исходной схеме.

Выводы

В расчетах установившихся режимов больших электрических систем, сети которых представлены эквивалентной матрицей узловых проводимостей, целесообразно:

а) определить структуру эквивалентного многополюсника для оптимального распределения оперативной памяти ЦВМ;

б) пересчитать ИЭМ при ряде изменений в исходной схеме взамен повторного эквивалентирования.

Ա. Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ՀԱՄԱՐԺԵՔ ԲԱԶՄԱՐՆԵՎՈՒ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԵՎ ՀԱՆԿՈՒՑԱՅԻՆ
ՀԱՂՈՐԴԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՏՐԵՑԱՅԻ ՎԵՐԱՀԱՇՎԱՐԿԸ ՆԱԽՆԱԿԱՆ,
ՍԽԵՄԱՅԻ ՓՈԳՈՒՄԱՆ ԿԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոգվածում առաջադրված է համարժեք բաղադրիչների կառուցվածքը որոշելու մեթոդ, որը կիրառելի է 500—1600 հանգույց պարունակող էլեկտրական համակարգի փոխարինման սխեմաների վերակառուցման դեպքում: Շարադրված մեթոդի հիման վրա «ՖՈՒՏՐՈՒՆ—4» ալգորիթմական լեզվով կազմված է ծրագիրը, որն ապահովում է թվային հաշվիչ մեքենայի հիշողության շահավետ օգտագործման խնդրի լուծումը:

Շարադրված է նաև համարժեք բաղադրիչների հանգույցային հաղորդականությունների մատրիցայի վերահաշվարկման ալգորիթմ՝ հաշվի առնելով նախնական սխեմայում տեղի ունեցած փոփոխությունները առանց վերջինիս կրկնակի համարժեքափոխման:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Адоян Г. Т. Многополюсник. Изд. АН АрмССР, 1975.
2. Максимович Н. Г. Линейные электрические цепи и их преобразования. ГЭИ, 1971.
3. Гамм А. Э. О нумерации узлов при расчетах установившихся режимов электрических систем методом Пьютона-Рафсона. «Электричество», 1970, № 2.
4. Коробчик К. В., Коваль А. Ю. Расчет установившихся электрических режимов при анализе статической устойчивости сложной энергосистемы. В кн. «Проблемы технической электродинамики», № 30, 1971.
5. Горюхов Ф. И., Журавлев В. Г. Применение метода преобразования цепей для расчета нормального режима электрических систем. «Электричество», 1969, № 5.
6. Качанова Н. А., Цукерник А. В. Вопросы методики и создания программ расчета установившихся электрических режимов больших энергосистем с числом узлов порядка 2000. В кн. «Проблемы технической электродинамики», № 30, 1971.
7. Батен В. С. и др. Расчет установившихся электрических режимов сложных энергосистем при эквивалентировании исходной схемы до заданного объема. В кн. «Проблемы технической электродинамики», № 42, 1973.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. В. ХЕЧУМЯН

ВИБРАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ
ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА СТАНКА

Шпиндель металлорежущего станка является наиболее ответственным узлом, определяющим точностные характеристики, надежность их сохранения, результаты обработки, температурный режим и динамическое качество станка.

Как известно, величина суммарной виброскорости является достаточно универсальным критерием качества изготовления узла станка, позволяющим также дифференцированно выявлять дефекты деталей и сборки. Это особенно важно для шпинделя, уровень вибрации холостого хода которого мал по сравнению с общей вибрацией главного привода и станка в целом, а акустический контроль отдельно взятого шпиндельного узла осложнен малым уровнем его шума по сравнению с фоном. Отсюда, контроль виброскорости отдельного шпиндельного узла во время его обкатки представляется необходимой операцией, предшествующей общему виброконтролю станка. Только на этой стадии сигнал суммарной вибрации чувствителен к определяющим качество дефектам изготовления и сборки шпинделя.

Вибросостояние полностью описывается пространственным спектром виброскорости и частотной характеристикой узла. На рис. 1 приведен спектр виброскорости в направлении X , измеренный в области головного подшипника шпинделя бесконсольно-фрезерного станка. Конструктивная схема шпиндельного узла ясна из рис. 2. Измерения проводились пьезоакселерометрами типа ИПА-9 с однократным интегрированием сигнала в сочетании с узкополосным гетеродинным анализатором спектра типа С4-12 (полоса пропускания $\pm 3,5$ Гц на уровне 3 дБ) и использованием в качестве опорного сигнала частоты вращения импульсов фотодатчика.

Предварительным расчетом, на основе известных кинематических соотношений [1] для подшипников качения с учетом комбинационных частот [2] от взаимодействия его элементов, были определены ожидаемые частоты дискретного спектра в функции частоты вращения, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Наименование дефекта	Частоты
Дисбаланс сепаратора	f_c
Разноразмерность тел качения по взаимодействию с дефектом неподвижного кольца	$k f_c$
Разноразмерность тел качения по взаимодействию с дефектом вращающегося кольца	$k f_{отн} = k(f_n - f_c)$ $f_{отн} = k(f_n - f_c) \pm f_c$ $k f_{отн} = k f_c z_{тк}$
Дефект неподвижного кольца	$k f_{отн} = k(f_n - f_c) \pm f_n$
Взаимодействие дефектов неподвижного и вращающегося колец	$k f_{вкн} = k(f_n - f_c) \pm f_{тк}$
Дефект вращающегося кольца	$k f_{тк}$
Некруглость тел качения	$f_{вкн} = k f_{вкн} \pm f_n$ $k f_{ткн} = k f_{тк}$ $f_{ткн} = k f_{тк} \pm f_c$

В табл. 1 частоты сепаратора f_c и тел качения $f_{тк}$ выражаются через частоту f_n вращения нижеследующими соотношениями: для радиально-упорного подшипника

$$f_c = \frac{f_n}{2} \left(1 - \frac{d_{тк}}{D_c} \cos \beta \right); \quad f_{тк} = f_c \left(1 + \frac{D_c}{d_{тк}} \cos \beta \right);$$

для упорного подшипника

$$f_c = \frac{f_n}{2}; \quad f_{тк} = f_c \frac{D_c}{d_{тк}},$$

где $d_{тк}$ — диаметр тел качения; D_c — диаметр сепаратора по оси центров тел качения; β — угол контакта.

Путем точного измерения частоты (цифровым частотомером) обнаруженных составляющих, сопоставления с набором ожидаемых частот, выявления зависимости от изменения частоты вращения n , в ряде случаев, путем синхронизации с опорным сигналом, были идентифицированы практически все составляющие. На рис. 1 сплошными, пунктирными и штрих-пунктирными линиями изображены составляющие, соответственно принадлежащие каждому из трех подшипников шпинделя, а под осью абсцисс даны обозначения, указывающие на источник возбуждения. Как следует из рисунка, спектр оказался достаточно богатым, и многие из ожидаемых составляющих проявились в спектре конкретного шпинделя. На том же рисунке показаны кривые изменения амплитуды спектральных составляющих при изменении их частоты, отображающие амплитудно-частотную характеристику шпиндельного узла; кривые получены плавным изменением скорости вращения шпинделя. Сопоставление формы частотной зависимости с интенсивностью линий показывает, что спектральные составляющие расположены, в основном, в областях резонансов, иными словами, огибающая спектра подобна амплитудно-частотной характеристике. Этот вывод показывает, что суммарная виброскорость (V_z) складывается из участков спектра в резонансных

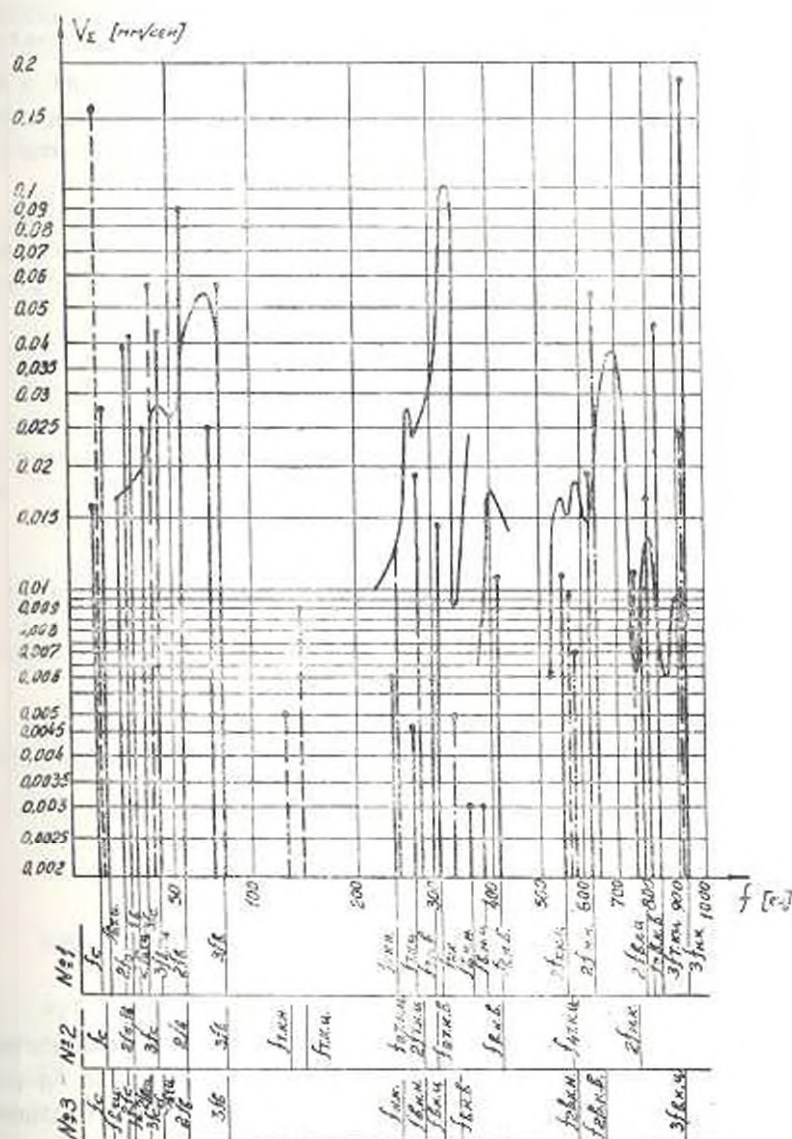


Рис. 1

областях и чувствительна к дефектам тогда, когда соответствующие им спектральные составляющие попадают в эти области. Уровень V_z определяется как интенсивностью возмущений от дефектов, так и резонансными свойствами системы (демпфированием, или добротностью Q).

С другой стороны, вибрации станка при резании возникают в большей степени на собственных частотах шпиндельного узла и зависят от тех же факторов: от добротности резонансов при вынужденных колебаниях вследствие воздействий прерывистого резания, а также от ин-



тенсивности возбудителей колебаний холостого хода при автоколебательных режимах непрерывного резания [3].

Таким образом, технологические дефекты изготовления и сборки выражаются как в изменении резонансных свойств узла, так и во внесении периодических силовых воздействий, порождающих соответствующие колебания.

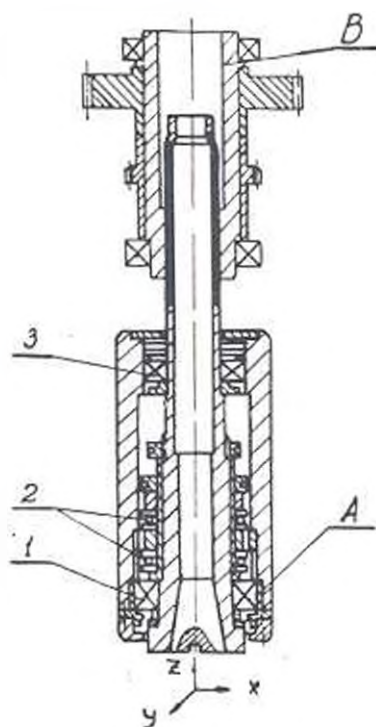


Рис. 2

Зависимость резонансных свойств от дефектов проиллюстрируем изменением частоты и добротности резонанса в области 311 Гц (рис. 1) в функции некруглости посадочной поверхности А под головной подшипник (рис. 2). Внесение трехгранности с максимальным отклонением 10 мкм привело к изменению резонансной частоты ω_p на 9 Гц и увеличению добротности Q примерно вдвое. Ясно, что параметры ω_p и Q зависят также от регулирования осевого натяга подшипников.

Интересным примером возникновения резонанса вследствие дефекта является параметрический резонанс из-за эксцентрисичности нерабочей поверхности В приводной шлицевой втулки (рис. 2). В партии шпиндельных головок была обнаружена резко повышенная вибрация при 800 об/мин, причем при всех других скоростях вращения уровень вибрации был существенно ниже. Несмотря на то, что собственная частота этой втулки с посаженной шестерней-маховиком находится в пределах $f_c = 40 \div 45$ Гц, наблюдался явно выраженный резонанс в области частоты 13,3 Гц. Анализ показывает, что модель движения адекватно описы-

ется дифференциальным уравнением с переменной жесткостью c , определяемой деформацией втулки как оболочки. При этом

$$c = k\delta, \quad (1)$$

где δ — переменная толщина втулки в направлении постоянно действующей силы зубчатого зацепления; k — коэффициент, зависящий от материала и расчетных условий.

Выражая δ через наружный (D) и внутренний (d) диаметры, эксцентриситет e и текущий угол поворота $\alpha = \omega t$, можно получить (1) в виде

$$c = k \left\{ \frac{D}{2} - \frac{d}{2} \cos \left[\arcsin \left(\frac{2e}{d} \sin \omega t \right) \right] + e \cos \omega t \right\}^2, \quad (2)$$

После разложения (2) в ряд Маклорена и учета первых двух членов имеем

$$c = k\delta_0^2 (\delta_0 - 3e \cos \omega t), \quad (3)$$

где $\delta_0 = \frac{D-d}{2}$ — средняя толщина втулки.

Уравнение свободных колебаний

$$m\ddot{x} + cx = 0$$

после подстановки (3) и $\omega t = 2\tau$ примет вид уравнения Матье:

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} + (a - 2q \cos 2\tau)x = 0, \quad (4)$$

где

$$a = \frac{4k\delta_0^2}{m\omega^2} = 4 \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^2; \quad q = 1,5 \frac{e}{\delta_0} a; \quad \omega_c = \sqrt{\frac{k\delta_0^3}{m}}.$$

Поскольку основная частота переменной составляющей усилия зацепления (в правой части уравнения движения) совпадает с частотой изменения переменного коэффициента, возникнет резонанс если параметры a и q попадают в одну из зон неустойчивых решений уравнения Матье по известной [4] диаграмме Айнса-Стретта (рис. 3). Действительно, при $\omega_c = 2\pi(40 \div 45) \text{ сек}^{-1}$ и $\omega = 2\pi 13,3 \text{ сек}^{-1}$ имеем $a = 36 \div 46$, и области граничных значений q , выделенной на рис. 3 пунктирной линией, при $\delta_0 = 13 \text{ мм}$ соответствуют по (4) значения эксцентриситета в интервале $1,2 \div 3,5 \text{ мм}$, в ней и оказались имевшие место смещения ($e = 1,5 \div 2,2 \text{ мм}$). Параметры a и q , соответствующие скоростям вращения 1000, 1250 и 1600 об/мин, попадают в зоны устойчивости (точки на рис. 3), что также соответствовало действительности.

Приведенные выше примеры показывают влияние дефектов на резонансные свойства; в табл. 2 иллюстрируется зависимость возмущающих воздействий от характера и величины дефекта.

Таблица 2

Характер и величина дефекта	Составляющие $k/f_{\text{нк}}$					
	$k=1$		$k=2$		$k=3$	
	$V_{\text{нзм}}$	V_c	$V_{\text{нзм}}$	V_c	$V_{\text{нзм}}$	V_c
Исходное состояние	0,011	1,0	0,019	2,7	—	—
Односторонняя деформация 13 мкм, 5%	—	—	—	—	—	—
Эллипсность 6 мкм	0,031	3,4	0,019	1,3	0,031	0,4
Эллипсность 50 мкм	0,220	5,7	0,280	39,0	0,036	0,4
Трехгранность 10 мкм	0,089	9,6	0,100	5,2	0,018	2,3

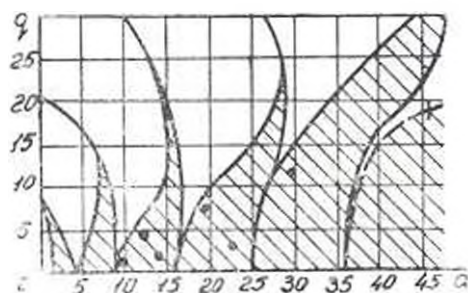


Рис. 3

В табл. 2 для составляющих ($k/f_{\text{нк}}$ — см. табл. 1) дефекта формы неподвижного кольца приведены величины виброскорости, измеренные в зоне головного подшипника ($V_{\text{нзм}}$ в мм/сек), и те же величины в относительных единицах (V_c), приведенные к входному воздействию с учетом резонансной характеристики системы. Дефекты различной формы и величины вносились деформированием поверхности 4 (рис. 2). Из табл. 2 следует, что любое искажение формы приводит к существенному увеличению воздействия на основной частоте — рост V_c в 3,4–9,6 раза для $k=1$. При этом внесение эллипсности существенно подчеркивает вторую гармонику (39,0 против 2,7 в исходном состоянии для $k=2$), а трехгранность увеличивает долю третьей гармоники в спектре (2,3 по отношению к 0,4 для $k=3$).

Приведенные выше соображения о вибросостоянии шпиндельного узла позволяют организовать его производственный вибрационный контроль как две последовательные операции:

1. Измерение и контроль по суммарной виброскорости V_c .
2. Анализ суммарной виброскорости дефектных шпинделей.

Первая операция требует задания таких режимов вращения, при которых все ожидаемые спектральные составляющие попадают в ту или иную известную резонансную область. Для рассматриваемого здесь шпиндельного узла сопоставление таблицы частот ожидаемых составляющих с выявленными частотными зонами резонансов позволило установить, как минимум, три контрольных режима из ряда чисел оборотов шпинделя (200, 630, 1600 об/мин). Измеренная суммарная виброскорость сопоставляется со статистически установленной нормой, в соответ-

выделения сигнала, чувствительного к дефектам независимо от величины дисбаланса шпинделя (т. е. линии f_n), часто определяющего V_c . Вместе с измерителем температуры нагрева шпинделя ($^{\circ}\text{C}$) описанная аппаратура составляет блок контроля.

Отдельно выделен блок анализа, который состоит из резонансного анализатора (индикатор нуля типа Ф510) с регулируемой добротностью в пределах 3 : 10 и электроннолучевой трубкой, звукового генератора и цифрового частотомера. При минимальной добротности резонатор, аналогично полосовому фильтру, позволяет быстро обнаружить частотные зоны значимых составляющих. После обнаружения такой зоны путем плавного изменения частоты вращения шпинделя значимая спектральная составляющая совмещается с резонансной частотой ω_p упругой системы (контроль — по максимуму сигнала на экране Ф510), и затем в режиме с максимальной добротностью анализатор подстраивается на эту же частоту. С помощью генератора и частотомера производится точное измерение величин ω_p и V_p в резонансе. Далее, обеспечивая путем изменения скорости вращения небольшую расстройку $\Delta\omega$ и измеряя при этом величину $V_{\Delta\omega}$ составляющей, получаем возможность определить:

$$Q = \frac{\omega_p V(V_p/V_{\Delta\omega}^2 - 1)}{2\Delta\omega}; \quad V_c = \frac{V_p}{Q}.$$

Таким образом, осуществляется разделение резонансных свойств Q и величины V_c возбуждения от дефекта. Измеренные частоты используются для выявления природы дефекта.

Чаренцаваский станкостроительный завод

Поступило 3.XI.1974.

Ա. Վ. ԽԵՇՈՒՄՅԱՆ

ՀԱՍՏԱՅԻ ԻԿԱՅԻՆ ՀԱՆԴՈՒՅՑԻ ԻՐԲՈՒՄՍՈՒՄՈՒՄ

Ու ժ ի ո լ ի ու ժ

Իլային հանգույցի իրբոափճակի որոշումը կատարվում է իրբոման տրադիցիան տարածական սպեկտրի փերլումոթյան հիման վրա: Ցույց է տրված սխեման ռեզոնանսային հատկությունների կախումը հեռազոտվող հանգույցի թերություններից:

Թերված է թերություններից առաջացած ռեզոնանսի օրինակ: Իլային հանգույցի իրբոափճակի հաակացությունը թույլ է տալիս կազմակերպել տրադիցիան իրբոառտոդոսմ հատուկ տարրափորման միջոցով:

ЛИТЕРАТУРА

1. Подшипники качения. Справочное пособие под ред. Н. А. Сивилева и А. Н. Сивилевского. «Машино», М., 1961.
2. Бродман Я. С., Давыдов К. С., Шустер С. Я. Модель возбуждения асинхронного электродвигателя. Известия АН АрмССР (серия Г. Н.), т. XXV, № 3, 1972.
3. Кудряков В. А. Динамика станков. Изд. «Машиностроение», М., 1967.
4. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник под ред. Н. А. Биргера и Я. Г. Пановко, т. 3, изд. «Машиностроение», М., 1968.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Г. Б. БАГДАСАРЯН, А. О. ГЕВОРКЯН

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЕФОРМАЦИИ СТРУЖКИ
ПРИ ОБРАБОТКЕ НА АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ

В настоящее время в индивидуальном и серийном производствах машиностроительной промышленности получили широкое распространение резцы конструкции ВНИИ, оснащенные трех-, четырех-, пяти- и шестигранными неперетачиваемыми (НП) пластинками из твердого сплава с вогнутой формой передних поверхностей. Эти резцы работают без регулируемых стружколомов. Завивание и дробление стружки достигается за счет их вогнутой формы. В связи с ростом автоматизации технологических процессов и применением металлорежущих станков с программным управлением актуальность применения неперетачиваемых резцов еще больше возрастает. Это объясняется тем, что такие инструменты по принципу действия отвечают современным технико-экономическим требованиям (отсутствие операции напайки и заточки, быстросменность, многогранность, взаимозаменяемость).

Однако резцы конструкции ВНИИ не получили широкого применения в массовом производстве в связи с образованием нежелательной формы стружки, сходящей в виде длинных полос, обматывающихся вокруг резца и обрабатываемого изделия. Это следует объяснить недостаточной изученностью влияния передних поверхностей и углов при их вершинах на механизм стружкообразования и деформацию снимаемого слоя металла.

Цель данного исследования заключается в определении условий оптимальной деформации срезаемого слоя в зависимости от формы передних поверхностей неперетачиваемых пластин.

Анализ геометрической формы передних поверхностей трех-, четырех-, пяти- и шестигранных пластин конструкции ВНИИ (см. рис. 1) показывает, что, несмотря на существенное геометрическое различие между ними, имеется признак, объединяющий их в единую группу режущих инструментов. Передняя поверхность у всех форм этих пластин представляет из себя усеченную пирамиду, в которой «заборная» часть образована пересечением двух боковых граней пирамиды в части, примыкающей к ее основанию. Поскольку принцип взаимозаменяемости всех граней рассматриваемых пластин вынуждает нас на определенном этапе пересечения плоскости главного сечения в направлении к вершине A (т. е. от ab к a_1b_1 и далее к a_2b_2 и т. д.) смириться с неизбежностью изменения формы линии пересечения этой плоскости с рабочей передней

поверхностью режущей пластинки, мы приходим к тому, что условия схода стружки, следовательно и степень деформации срезаемого слоя, должны изменяться после того, как движущаяся плоскость перейдет за точку B . Как видно из рис. 1, угол перелома линии пересечения φ увеличивается с переходом от трехгранных к шестигранным пластинкам.

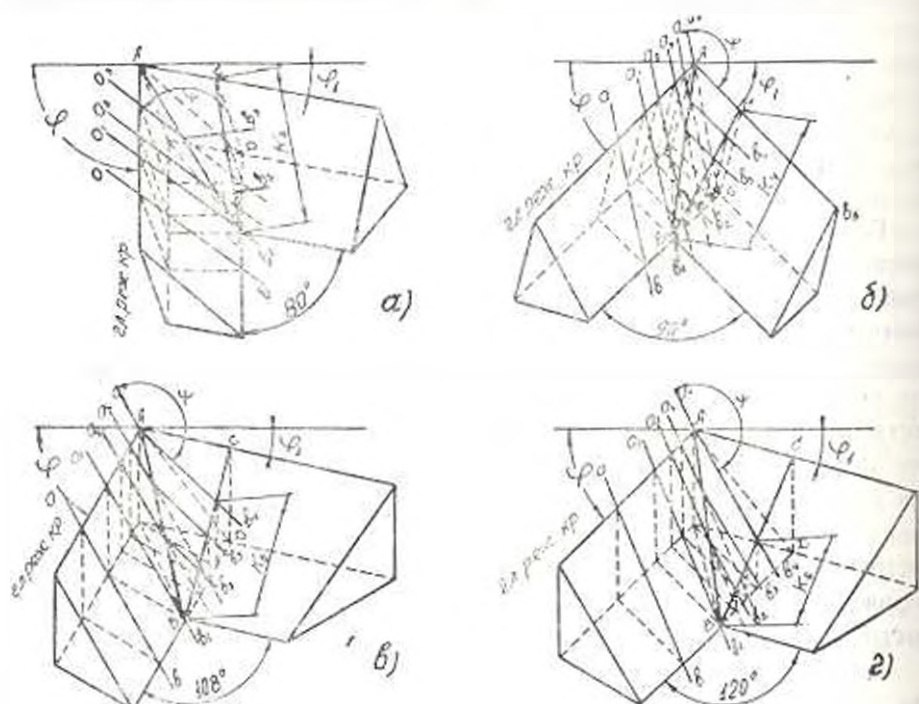


Рис. 1. Геометрические формы передних поверхностей неперетачиваемых пластин:

- а — трехгранной ($\varphi = 80^\circ$, $\varphi_1 = 10^\circ$);
- б — четырехгранной ($\varphi = 90^\circ$, $\varphi_1 = 1^\circ$);
- в — пятигранной ($\varphi = 60^\circ$, $\varphi_1 = 1^\circ$);
- г — шестигранной ($\varphi = 15^\circ$, $\varphi_1 = 15^\circ$).

Неперетачиваемые многогранные пластины, выпускаемые фирмами «Кониметалл» (США), «Сандвик Коромант» (Швеция) и др., имеют специальные стружкозавивательные канавки постоянного сечения, расположенные в непосредственной близости от режущей кромки. Однако, как показала практика, канавки с постоянным сечением не обеспечивают надежного дробления стружки при различных условиях работы. С целью достижения большей универсальности в последнее время те же фирмы запатентовали неперетачиваемые пластины с переменным радиусом стружколомающих канавок [1, 2], которые сложны в изготовлении.

Главное достоинство формы передних поверхностей конструкции ВНИИ, как это видно из рис. 1, заключается в универсальности создания условий деформации срезаемого слоя. В зависимости от поставленной задачи путем соответствующей установки их на резцодержавке можно добиться образования любой формы стружки. Это обуславливает необходимость поиска оптимального варианта установки пластин

на резцодержавках. Решение этой задачи позволит четко установить возможности применения пластин ВПНН на автоматических линиях. Кроме того, профиль передних поверхностей достаточно технологичен. Некоторое сомнение вызывает равномерность распределения плотности прессования в различных точках пластины, связанная с резкими переходами профиля передних поверхностей. Данный вопрос, по мнению авторов, имеет важное значение для работы с заданной стойкостью и подлежит исследованию.

Решению основной задачи предшествовало предварительное исследование с целью сравнительной качественной оценки стружкоблокирующих способностей конструкции передних поверхностей трех-, четырех-, пяти- и шестигранных неперетачиваемых пластин. Для этого была организована группа технологов для визуального наблюдения за формой схода стружки в производственных условиях*.

Исследования проводились при продолжении течения заготовок диаметром 100 ÷ 200 мм на четырех станках модели 153 при достаточной жесткости СИНД и отсутствии вибраций. Обработываемыми материалами служили Сталь 3 и Сталь 45. Этим самым преследовалась цель оценить влияние механических свойств материалов.

Геометрические параметры испытываемых резцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Резец	Углы в плане, град		Передние углы, град		Задние углы, град		Угол наклона главной режущей кромки
	γ	γ_1	$\lambda_{уст}$	λ	α	α_1	λ
Трехгранный	90	10	8	14,5	5,5	6,5	6
Четырехгранный	45	15	7	13,0	7,0	3,0	3
Пятигранный	60	12	7	14,0	6,0	6,0	5
Шестигранный	45	15	7	13,0	7,0	3,5	0

Анализ визуальных наблюдений показал, что при режимах резания $s > 0,51$ мм/об, $t > 1$ мм и $v > 160$ м/мин эксплуатационные качества этих резцов сильно ухудшаются. Наблюдается притесненный сход стружки, приваривание ее к головке центрального базового штифта, а в некоторых случаях даже к крепящему клину; наблюдается поломка неучаствующей в процессе резания резервной кромки, а также выкрашивание кромок центрального технологического отверстия.

Для проведения серии экспериментов авторы, используя выявленные факторы, влияющие на улучшение формы стружки, применили метод факторного эксперимента. План и результаты экспериментов приведены в табл. 2. Длительность одного опыта должна была обеспечить стабилизацию процесса резания при работе на заданном режиме, а также получение количества стружки для надежного определения ее

* Механический цех № 3 Ленинградского завода «Стромятинский».

усадки по длине. Исходя из этого, необходимое время опыта принято равному времени одного прохода резца на 500 мм.

Таблица 2

№ эксперимента	План экспериментов					Тип инструмента	Форма сходящей стружки (условное обозначение)	Коэффициент продольной усадки	№ эксперимента	Тип инструмента	Форма сходящей стружки (условное обозначение)	Коэффициент продольной усадки
	$v, \text{ м/мин}$	$s, \text{ мм/об}$	$f, \text{ мм}$	Материал	Рабочая среда							
1	85	0,25	1,5	Ст. 45	вакуум	четырехгранный, $\epsilon = 80^\circ$	C	1,98	13	трехгранный, $\epsilon = 80^\circ$	B	1,82
2	165	0,25	1,5	Ст. 3	СОЖ	.	D	2,26	14	.	B	1,85
3	85	0,25	4,0	Ст. 45	СОЖ	.	A	1,73	15	.	B	1,76
4	85	0,51	4,0	Ст. 3	вакуум	.	B	1,86	16	.	B	1,80
5	165	0,51	1,5	Ст. 3	СОЖ	.	B	1,81	17	.	B	1,79
6	165	0,51	4,0	Ст. 3	вакуум	.	B	1,71	18	.	B	1,75
7	85	0,25	4,0	Ст. 3	СОЖ	шестигранный, $\epsilon = 120^\circ$	E	2,34	19	пятигранный, $\epsilon = 120^\circ$	A	1,81
8	165	0,25	1,5	Ст. 45	вакуум	.	D	2,04	20	.	B	1,65
9	165	0,25	4,0	Ст. 3	вакуум	.	C	2,06	21	.	D	2,25
10	85	0,51	1,5	Ст. 3	вакуум	.	B	1,85	22	.	B	1,82
11	165	0,51	4,0	Ст. 3	СОЖ	.	A	1,75	23	.	A	1,69
12	85	0,51	1,5	Ст. 45	СОЖ	.	B	1,72	24	.	B	1,78

Выбирались та форма стружки, которая отличалась стабильностью образования в период прохождения полного прохода.

После завершения экспериментов стружки фотографировались, а затем классифицировались по формам, которых оказались всего пять. Формы стружек, условно обозначенные буквами А, В, С, D и Е, приведены в табл. 2 и на рисунках 2, 3, 4 и 5.

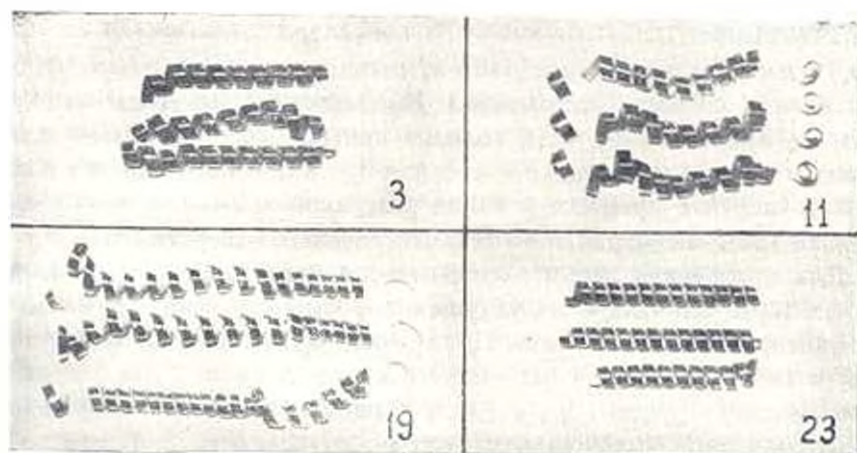


Рис. 2. Стружки формы А

Величина коэффициента продольной усадки стружки определялась весовым методом для 7—10 стружек из каждого опыта.

Форма стружки *A* принимается за оптимальную. Она представляет собой спирали в виде отдельных отрезков длиной 50—150 мм. Стружка типа *B* удобна с точки зрения технологии уборки, однако разлетается вокруг станка. Для автоматических же линий такую форму стружки следует считать пригодной. Стружки типов *C*, *D* и *E* являются нежелательными, но из них самой нежелательной является форма *D*.

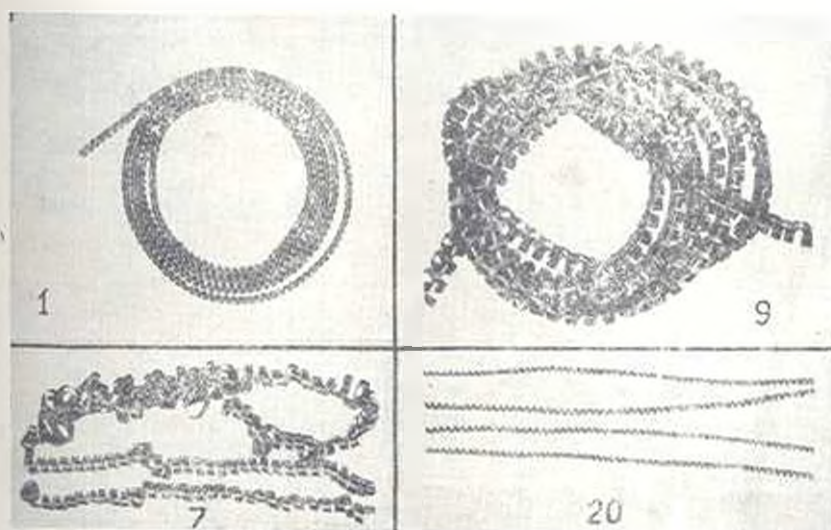


Рис. 3. Стружки формы *C* (1; 9) и формы *E* (7; 20)

Таким образом, требованию задачи данного исследования удовлетворяют стружки форм *A* и *B*. Анализ показателей деформаций срезаемого слоя показывает, что стружки одной формы имеют деформацию одного порядка независимо от типа инструмента и условий работы, за исключением свойств обрабатываемого материала.

Пределы условий образования стружек *A* и *B* в зависимости от типа реза и отдельных принятых факторов могут быть получены из графиков, приведенных на рис. 6. Эти графики построены путем качественной обработки форм стружек и показателей их деформаций. На них по вертикали размещены формы стружек, а по горизонтали—факторы, влияющие на улучшение формы стружки. Последовательность расположения форм стружек по вертикали находится в соответствии с возможным переходом одной формы в другую при изменении факторов, расположенных по горизонтали. Данные графики дают возможность определить пределы стружкоблокирующих способностей форм передних поверхностей рассмотренных неперетачиваемых пластин при существую-

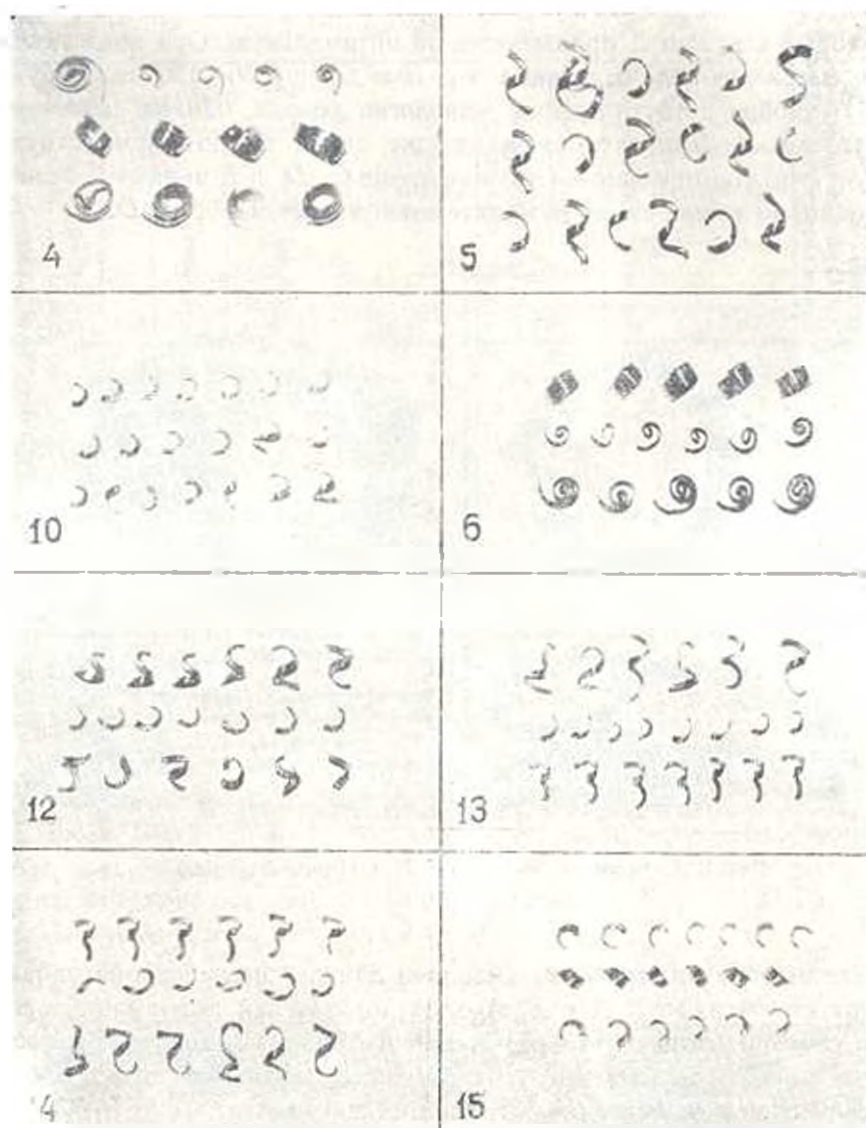


Рис. 1. Стружки формы В

шем варианте установки их на резцедержавках. Заштрихованная область на графиках является областью оптимальной деформации срезаемого слоя. Принимая уровень формы стружки А за начало области, определяется диапазон условий оптимальной деформации стружки. В зависимости от числа граней эти условия приведены в табл. 3. Результаты контрольных экспериментов подтвердили справедливость приведенных в табл. 3 условий.

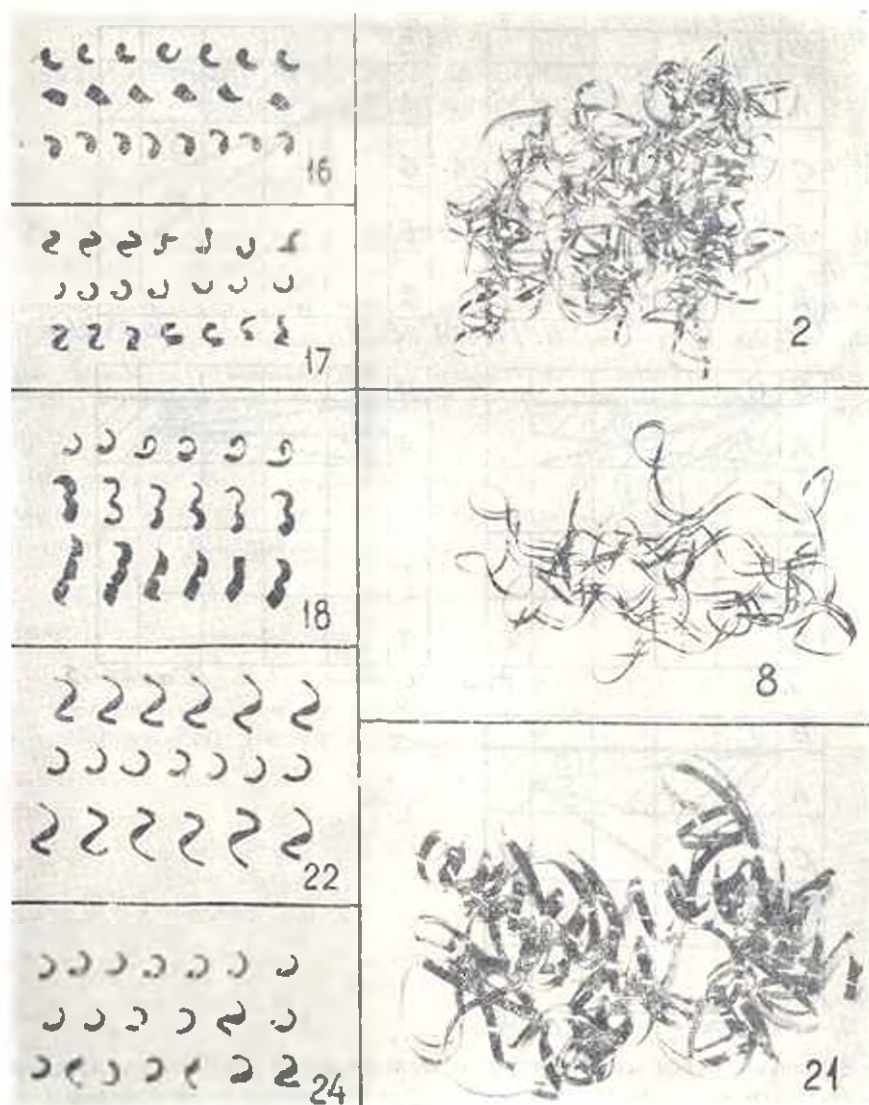


Рис. 5. Стружки формы В (16; 17; 18; 22; 24) и формы D (2; 8; 21)

Таблица 3

Тип резца	Режимы резания			Обрабатываемый материал	Рабочая среда	Формы стружки	Показатель деформации стружки
	$s, \text{мм/мин}$	$s, \text{мм/об}$	$t, \text{мм}$				
Трехгранный	85 ÷ 165	0.25 ÷ 0.51	1.5 ÷ 4	Сталь 3 Сталь 45	Воздух СОЖ	A, B	1.69 — 1.86
Четырехгранный	85 ÷ 165	0.33 ÷ 0.51	1.5 ÷ 4	Сталь 3 Сталь 45	Воздух СОЖ	A, B	1.69 — 1.86
Пятигранный	85 ÷ 110	0.39 ÷ 0.51	1.5 ÷ 4	Сталь 3 Сталь 45	Воздух СОЖ	A, B	1.69 — 1.86
Шестигранный	85 ÷ 115	0.45 ÷ 0.51	1.5 ÷ 4	Сталь 3 Сталь 45	Воздух СОЖ	A, B	1.69 — 1.86

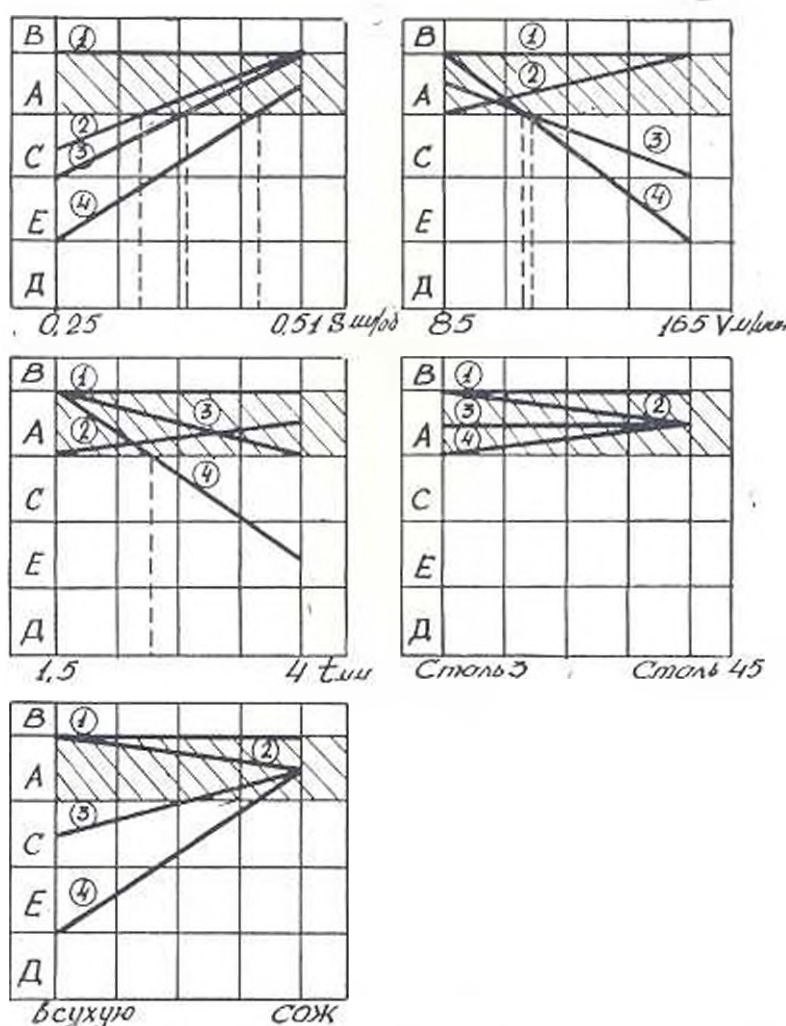


Рис. 6. Влияние основных параметров резания на форму стружки при пластинах: 1—трехгранной; 2—четырёхгранной; 3—пятигранной; 4—шестигранной

Выводы

1. Резец, оснащенный трехгранной неперетачиваемой пластиной формы 02, занимает особое место среди всех типов резцов. При принятых уровнях угол $\alpha = 80^\circ$ обеспечивает стабильное образование стружки форм А и В независимо от действующих на него факторов.

2. Резцы, оснащенные четырех-, пяти- и шести-гранными пластинами, чувствительны к факторам, влияющим на улучшение формы стружки.

Հ. Ռ. ԲԱԶՊԱՍԱՐՅԱՆ, Հ. Հ. ԿԵՂՈՐԻՅԱՆ

ՏԱՇԵՂԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻ ԱՌԱՋԱՑՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐԸ
ՄԵՏԱՂԸ ԱՎՏՈՄԱՏ ԿԾԵՐՈՎ ՄՇԱԿԵԼԻՍ

Ա մ փ օ փ ու մ

Ափսոմաս ճաստոցների ու ափսոմաս դծերի պարկի անընդհատ աճման պայմաններում տաշեղադոյացման ձևի և բնույթի փոփոխությունը, ինչպես նաև արտադրողական սեփականների բնորոշությունը ստանում են մեծ նշանակություն:

Հողվածում բերված է տաշեղադոյացման վրա ազդող գործոնների փոփոխական հղանակով ստուգումը և առաջարկվում է տաշեղի սպտիմալ ձևի բնորոշությունը գործոնային մաթեմատիկական պլանավորման գործերի միջոցով:

Առաջարկվում են մի շարք միջոցառումներ, որոնք նպաստում են օպտիմալ տաշեղաձևի ստացմանը՝ չարիող երեք-, չորս-, հինգ-, և վեցնիսա կարծր միասնավածքի թիթեղիկներով աշխատելիս:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Экспресс-информация, режущие инструменты, № 8, 1974.
2. Экспресс-информация, режущие инструменты, № 22, 1969.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

С. И. МАЛУКЯН, Э. И. МАЛУКЯН, В. М. ПИСАРЕНКО

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПЛАНОВ РЕГРЕССИОННЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ СО СВОЙСТВАМИ ϵ -ОПТИМАЛЬНОСТИ

Проблема извлечения наибольшего количества сведений об изучаемых процессах при ограниченных затратах на эксперименты является весьма актуальной. В этой связи оказывается необходимым применение методов, которые давали бы не только способ обработки экспериментальных данных, измеряемых при воздействии некоторых случайных помех, но и позволили бы оптимальным образом организовать проведение регрессионных экспериментов. Изложим следующую математическую постановку проблемы планирования оптимальных экспериментов, являющуюся достаточно общей.

Пусть на основе априорной информации о механизме исследуемого процесса экспериментатором выбран аналитический вид функции, описывающей связь между координатами $X_1, X_2, \dots, X_n$ факторного пространства и исследуемой величиной Y ,

$$Y = F(X, Y, Q). \quad (1)$$

Параметры $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, входящие в (1), определяются на основе обработки экспериментальных данных и выбираются, исходя из принципа максимума правдоподобия.

Проблемой планирования экспериментов является определение совокупности тех точек факторного пространства, в которых при реализации экспериментов получаем статистический материал, позволяющий наилучшим образом оценить искомые значения параметров $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ при минимальных затратах на эксперименты. В настоящее время при статистической обработке результатов экспериментов наибольшее распространение получил метод наименьших квадратов. Найденные по этому методу совместные эффективные оценки неизвестных параметров $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ имеют дисперсионную матрицу $|1|$:

$$D(\bar{Q}) = M^{-1}(\bar{Q});$$

$$M(Q) = \sum_{i=1}^k z_i^{-2} f(X^i) \cdot f^T(X^i);$$

$$f(X) = \nabla \cdot Y(X, Q); \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \left\| \frac{\sigma}{\sigma Q_1} : \frac{\sigma}{\sigma Q_2} : \dots : \frac{\sigma}{\sigma Q_n} \right\|.$$

где σ^2 — дисперсия измерений исследуемой величины при i -ом эксперименте;

$M(\bar{Q})$ — информационная матрица Фишера.

Дисперсионная матрица $D(Q)$ геометрически интерпретируется как некоторый эллипсоид рассеяния точек $\bar{Q}$ в пространстве неизвестных параметров, объем, площадь поверхности, сумма полуосей и подобные геометрические параметры которого характеризуют близость полученных оценок $\bar{Q}$ к их истинным значениям [2]. Существует целый ряд методик по составлению оптимальных планов, минимизирующих параметры эллипсоида рассеяния на множестве планов в заданной области. Большинство разработанных к настоящему времени планов хорошо зарекомендовали себя в простых задачах, при небольшом числе неизвестных параметров Q_i и линейных моделях. Встречаемые же на практике сложные прикладные задачи отличаются сильно выраженной нелинейностью и наличием большого числа неизвестных параметров в предполагаемой математической модели исследуемого процесса. Как показывает практика, применение имеющихся методик по составлению планов экспериментов, минимизирующих обобщенные параметры эллипсоида рассеяния, в этих случаях не оправдывают себя. Эллипсоиды рассеяния при них получаются сильно вытянутыми, что увеличивает коридор ошибок искоемых параметров и затрудняет процедуру поиска этих параметров по методу наименьших квадратов. Если учесть, что полуоси эллипсоида рассеяния характеризуются собственными числами дисперсионной матрицы $\{D(\bar{Q})\}$, то это явление можно устранить, если регрессионные эксперименты проводятся по так называемым E -оптимальным планам, при обработке результатов которых получаются минимальные значения максимальных собственных чисел, соответствующих дисперсионной матрице. Но при построении подобных планов возникает необходимость многократного выполнения трудоемкой операции определения собственных чисел матриц, что и является существенным препятствием при построении и применении E -оптимальных планов. Для разрешения вышесказанных проблем в настоящей статье предлагается метод построения планов последовательных экспериментов, позволяющий после обработки их результатов уменьшить вытянутость эллипсоида рассеяния, при этом опускается трудоемкая операция вычисления собственных чисел матриц.

При нашем стремлении к уменьшению вытянутости эллипсоида рассеяния и коридора ошибок искоемых параметров, естественно было бы поставить перед каждым новым $(N+1)$ -ым экспериментом задачу минимизации выражения

$$|1 + \alpha \Phi(N+1)| L[D(N+1)] = \min_{x \in X} |1 + \alpha \Phi(N+1)| L[D(N+1)], \quad (3)$$

где α — постоянный коэффициент;

X — точка в факторном пространстве, где должен проводиться очередной $(N+1)$ -ый эксперимент;

L — функционал, ставящий в соответствие каждой матрице $D(N+1)$ некоторую скалярную величину, характеризующую точность определения оценок искомых параметров.

В частности он может быть $\det D(N+1)$, использование которого приводит к минимизации объема эллипсоида рассеяния, $\text{Sp } D(N+1)$, минимизирующий сумму полуосей эллипсоида, и т. д.

$\Phi(N+1) = \Phi(N, X)$ — положительная функция, находящаяся в пропорциональной зависимости от максимального разброса собственных чисел дисперсионной матрицы $D(N+1)$.

Присутствие в (3) функции $\Phi(N+1)$ позволит наряду с уменьшением обобщенных параметров эллипсоида рассеяния, как это делается в широко распространенных методах планирования, уменьшить также и его вытянутость. В качестве функции $\Phi(N+1)$, удовлетворяющей вышеуказанным требованиям, предлагается применять функцию вида:

$$\Phi(N, X) = \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^n \left(\frac{\lambda_i - \lambda_j}{\lambda_i} \right)^2 = \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^n \left(\frac{\lambda_j - \lambda_i}{\lambda_j} \right)^2, \quad (4)$$

где λ_i — i -ое собственное число дисперсионной матрицы оценок искомых параметров, полученных в результате обработки данных $N+1$ экспериментов;

$\lambda_i = \frac{1}{\lambda_i}$ — i -ое собственное число, соответствующее информационной матрице Фишера.

При непосредственном вычислении функции $\Phi(N, X)$ по формуле возникает необходимость выполнения трудоемких операций по определению собственных чисел информационной матрицы. Покажем, что выражение (4) можно вычислять и без определения самых собственных чисел λ_i .

Заменим функцию (4) некоторым ее приближением, которое также достаточно хорошо характеризует разброс собственных чисел дисперсионной матрицы, т. е.

$$\Phi(N, X) = \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^n \left(\frac{\lambda_i - \lambda_j}{\lambda_{cp}} \right)^2, \quad (5)$$

где

$$\lambda_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

Преобразуем последнее выражение:

$$\Phi(N, X) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i, \text{ср}})^2 = \frac{1}{2} \left| n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right|.$$

Используя известные соотношения матричной алгебры [3], отражающие связи между собственными числами матрицы с ее элементами, получим:

$$\begin{aligned} \Phi(N, X) &= \frac{n^2}{\left(\sum_{i=1}^n m_{ii} \right)^2} \left| n \sum_{i=1}^n m_{ii}^2 - \left(\sum_{i=1}^n m_{ii} \right)^2 \right| = \\ &= \frac{n^2 \left\{ n \sum_{i=1}^n m_{ii}^2 - |\text{Sp} M(N+1)|^2 \right\}}{|\text{Sp} M(N+1)|^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где m_{ij} — элементы информационной матрицы $M(N+1)$.

Использование формулы (6) для вычисления функции $\Phi(N+1)$ уже не представляет особой трудности и не требует выполнения таких трудоемких операций, как определение собственных чисел, обращение матриц и т. д.

Уменьшению вытянутости эллипсоида рассеяния способствует также и обоснованный выбор скаляра $1/D(N+1)$. Практика применения так называемых A -оптимальных планов, при которых минимизируется $\text{Sp} D(N+1)$, показывает, что при достаточной эффективности каждого эксперимента, проведенного по такому плану, эллипсоиды получаются менее вытянутыми. Основным препятствием применению таких планов на практике можно считать необходимость выполнения обращения матриц на каждом шагу поисковой процедуры оптимизации функционала (3); при поиске необходимо вычислять значение $\text{Sp} D(N+1) = \text{Sp} [M(N) + z^{-2}(X)f(X)f'(X)]^{-1}$ при различных значениях X . Заменяя трудоемкую операцию обращения информационной матрицы более простыми, можно облегчить вычислительный процесс при поиске минимума функционала (3). Покажем, что такая замена при вычислении $\text{Sp} M^{-1}(N+1)$ возможна, если известно значение $\text{Sp} M^{-1}(N)$ и измеряемая величина Y , характеризующая исследуемый процесс, является одномерной. Для этого преобразуем выражение для $\text{Sp} D(N+1)$ к виду:

$$\begin{aligned} \text{Sp} D(N+1) &= \text{Sp} [M(N) + z^{-2}(X)f(X)f'(X)]^{-1} = \\ &= \text{Sp} [I + M^{-1}(N)z^{-2}(X)f(X)f'(X)]^{-1} M^{-1}(N). \end{aligned}$$

Примем $M^{-1}(N) = D(N)$; $D(N)z^{-2}(X)f(X) = A$; $f'(X) = B$ и воспользуемся следующей леммой [1]:

$$[I_p + A \cdot B]^{-1} = I_p - A[I_q + BA]^{-1} \cdot B.$$

где I_p и I_q — единичные матрицы размера $p \times p$ и $q \times q$;
 A — матрица размера $p \times q$;
 B — матрица размера $q \times p$.

Тогда

$$\text{Sp } D(N+1) = \text{Sp} [I_m - D(N) \sigma^{-2}(X) f(X) \{1 + f^*(X) D(N) \sigma^{-2}(X) f(X)\}^{-1} \times \\ \times f^*(X) \} D(N)].$$

Обозначив $\{1 + f^*(X) D(N) \sigma^{-2}(X) f(X)\}^{-1} = R$, получим:

$$\begin{aligned} \text{Sp } D(N+1) &= \text{Sp} [I_m - R D(N) \sigma^{-2}(X) f(X) f^*(X)] \cdot D(N) = \\ &= \text{Sp } D(N) - \text{Sp } R D(N) \sigma^{-2}(X) f(X) f^*(X) D(N) = \\ &= \text{Sp } D(N) - \text{Sp } R \sigma^{-2}(X) f^*(X) D(N) D(N) f(X). \end{aligned}$$

Так как в последнем выражении второе слагаемое представляет собой скалярную величину, то окончательно можно записать:

$$\text{Sp } D(N+1) = \text{Sp } D(N) - \{1 + f^*(X) D(N) \sigma^{-2}(X) f(X)\}^{-1} f^*(X) \sigma^{-2}(X) \times \\ \times D^2(N) f(X). \quad (7)$$

Очевидно, что при вычислении $\text{Sp } D(N+1)$ по формуле (7) не требуется выполнения операции обращения матриц. Вместо нее выполняются операции умножения матриц, что не представляет собой особых вычислительных трудностей.

Обобщая полученные результаты, предложим следующий итерационный алгоритм метода последовательного планирования оптимальных экспериментов:

1. Проводится некоторый стартовый эксперимент из N_0 измерений;
2. Проводится обработка результатов измерений стартового эксперимента методом наименьших квадратов, в результате которой получаются однозначные оценки Q_i и приближенное значение их дисперсионной матрицы;
3. Определяются координаты точки факторного пространства, в которой необходимо проводить следующее $(N+1)$ -ое измерение как координаты вектора X , минимизирующего метрику (3)

$$\min_{X \in X} \{ |1 + \Phi(N, X)| L[D(N, X)] \}.$$

На каждом шагу поиска минимума последнего функционала используются ранее полученные выражения (6) и (7);

4. Проводится $(N+1)$ -ый эксперимент при найденных значениях факторов $X_1, X_2, \dots, X_n$, после результатов которого уточняются ранее найденные значения оценок Q_i и соответствующей дисперсионной матрицы;

5. Проверяется условие

$$|Q_i(N+1) - Q_i(N)| < \varepsilon_i, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

где ε_i — заранее заданное малое число.

Если условие (8) не удовлетворяется, то выполняется переход к операциям, описанным в пункте 3, в противном случае итерационный процесс планирования и экспериментирования прекращается.

В качестве примера рассмотрим химическую реакцию типа



в которой реагент R — первичный спирт с длиной цепочкой; P_1 — олефин; P_2 — вода. Теоретический анализ данной реакции показал, что она может быть описана следующей моделью:

$$Y(X, Q) = \frac{Q_1 Q_2 X_1}{1 + Q_1 X_1 + Q_2 X_2} \quad (8)$$

где Y — скорость реакции; X_1 и X_2 — парциальные давления продуктов R и R_1 соответственно, Q_i — константы реакции.

Требуется спланировать и реализовать эксперименты, результаты которых позволят как можно точнее определить Q_1 , Q_2 , Q_3 . Будем считать, что эксперименты можно реализовать в области

$$0 \leq X_1 \leq 3; \quad 0 \leq X_2 \leq 3.$$

Эксперименты и результаты измерения будем имитировать, используя таблицу случайных чисел. Предполагается, что Y нормально распределено около среднего $Y(X, Q_{ист})$ с дисперсией $\sigma^2 = 0.01$. Истинные значения параметров Q_i известны: $Q_{1,ист} = 2.9$; $Q_{2,ист} = 12.2$; $Q_{3,ист} = 0.69$. (Предполагается, конечно, что значения $Q_{ист}$ экспериментатору неизвестны.)

Приведем стартовый эксперимент в четырех точках факторного пространства $\{1; 1\}$; $\{2; 1\}$; $\{1; 2\}$; $\{2; 2\}$, в которых измерение Y дало результаты: $Y_1 = 0.126$; $Y_2 = 0.219$; $Y_3 = 0.076$; $Y_4 = 0.126$. Предварительные оценки Q_i , полученные на основе этих данных, равны $\bar{Q}_1 = 10.39$; $\bar{Q}_2 = 48.83$; $\bar{Q}_3 = 0.74$. Принимая, что оценки $\bar{Q}$ (4) не слишком отличаются от истинных, вычисляем функцию $f(X) = \sigma \cdot Y(X, \bar{Q}(4))$ в четырех точках стартового эксперимента. Составляем информационную матрицу для пяти экспериментов:

$$M(5) = M(\bar{Q}, X) = \sum_{i=1}^4 f(\bar{Q}, X_i) \cdot f'(\bar{Q}, X_i) + f(\bar{Q}, X) f'(\bar{Q}, X).$$

где X — координаты точки пятого эксперимента в факторном пространстве.

Используя элементы полученной матрицы, составляем функционал $\Phi(4, X)$ по формуле (6). Подставим его в (3) и с помощью поисковой программы на ЦВМ находим точку в факторном пространстве, в которой функционал (3) получается минимальным.

Вычисления на ЦВМ дали следующие значения: $X_1 = 0.152$; $X_2 = 1.01$. При расчетах на ЦВМ в качестве $L(D(N+1))$ в формуле (3) использовался $\det D(N+1)$ [1]. Эксперимент, проведенный в этой точке, дал результат $Y = 0.352$. Используя его, получим:

$$\bar{Q}(5) = \| 3,05; 13,5; 0,8 \|.$$

Вышеописанным же образом планируем и реализуем следующие эксперименты. Результаты планирования и опытов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Номер опыта	x_1	x_2	$\bar{Q}_1$	$\bar{Q}_2$	$\bar{Q}_3$
1	1,00	1,00	—	—	—
2	2,00	1,00	—	—	—
3	1,00	2,00	—	—	—
4	2,00	2,00	10,39	48,83	0,74
5	0,15	0,01	3,05	13,50	0,80
6	3,01	0,01	3,11	13,30	0,65
7	0,15	0,00	3,04	12,50	0,60
8	3,01	0,01	3,06	12,15	0,68
9	0,21	0,00	3,00	12,17	0,68
10	3,00	1,05	2,95	12,16	0,67

Сравнивая полученные результаты с результатами планирования и опытов, проведенных в работе [1] для выяснения механизма рассматриваемой здесь реакции, приходим к выводу, что предложенная в настоящей статье методика позволила при меньшем количестве экспериментов получить оценки искомых параметров $\bar{Q}_i$ с меньшим значением коридора ошибок. Так, например, в работе [1] составлялись D -оптимальные последовательные планы экспериментов, которые после 13 экспериментов позволили получать оценки:

$$Q(13) = \| 3,57; 12,77; 0,63 \|.$$

Таким образом, предложенная методика позволяет получать планы экспериментов, близкие к E -оптимальным, при этом не требуется многократного выполнения таких трудоемких вычислительных операций, как вычисление детерминантов, собственных чисел, обращение матриц и т. д.

ГрНХ им. К. Маркса

Поступила 19.VI.1975

Ա. Ն. ՄԱՎՈՒԿՅԱՆ, Է. Ն. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Վ. Ն. ՊԻՈՒՐԵՆԿՈ

ՌԵԲԵՐԵՍԻՆ ՓՈՐՁԵՐԻ Է-ՕՊՏԻՄԱԼՅՈՒՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆ ՌԵՆԵՑՈՂ
ՀԱՋՈՐԴԱՆԱՆ ՊԼԱՆԱՎՈՐՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Ա. Վ. Փ Ր Ո Ր Ո Ւ Մ

Աշխատանքում առաջարկվում է փորձերի օպտիմալ պլանավորման մեթոդ, որի նպատակն է պարզել հետազոտվող երևույթի որոշվող մասնավոր հատկանիշարարի մեջ մտնող անհայտ հաստատունների արդյունքը Առաջարկ-

վող մեթոդը թույլ է տալիս փորձերի մինիմալ քանակի դեպքում ստանալ որոշվող հաստատունների արժեքների ղեկավարական մեծ ճշտությամբ: Փորձերի պլանավորման առաջարկված մեթոդը իրականացնելու համար չի պահանջվում բարդ, աշխատատար հաշվողական գործողություններ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. Изд-во «Наука», 1971.
2. Sibson R. (1972) Discussion of paper by H. P. Wynn. I. R. Statist. Soc. B—34, 181—3.
3. Пароди М. Локализация характеристических чисел матрицы и ее применение. Изд-во «Иностр. литература», 1960.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Н. Г. СЕРАФЯН, М. Н. АВАКЯН

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ
КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ

В статье рассматриваются простейшие способы организации взаимодействия работы нескольких подсистем, приводящие к целесообразному поведению динамической сложной системы. В частности, применяются методы конечных автоматов поведения конечных автоматов для описания действий простейших моделей функционирования взаимодействия.

Рассмотрим вопросы оптимального управления коллективным автоматом, состоящим из n стохастических автоматов $A_1, A_2, \dots, A_n$, которые функционируют параллельно. Состояние всей системы определяется вектором

$$S = (S_1^{(n)}, S_2^{(n)}, \dots, S_n^{(n)}), \quad (1)$$

где $S_k^{(n)}$ — состояние автомата A_k . Для каждого состояния $S_k^{(n)}$ автомата A_k имеется набор управлений. Будем считать, что для состояния всей системы (1) управление представляет собой вектор

$$U = (U_1^{(n)}, U_2^{(n)}, \dots, U_n^{(n)}), \quad (2)$$

где $U_k^{(n)}$ — одно из управлений автомата A_k для состояния $S_k^{(n)}$. Если в своем функционировании автоматы $A_1, A_2, \dots, A_n$ как-то связаны между собой, то следует считать, что не все наборы (2) возможны в качестве управлений для состояния системы (1). Будем предполагать, что для каждого состояния (1) имеется набор сигналов управления; число этих сигналов, вообще говоря, меньше, нежели число всех возможных векторов (2). Каждому сигналу соответствует некоторый вектор управления (2).

Исходя из матриц переходов для автоматов $A_1, A_2, \dots, A_n$, можно построить матрицы переходов для всей системы. Тогда всю систему можно рассматривать как один автомат. Однако характеристика поведения этого автомата может определяться по-разному. Остановимся на двух естественных подходах к определению характеристики поведения системы, или, пользуясь терминами динамического программирования, к определению ее дохода.

Для удобства изложения откажемся от привычной нумерации состояний системы, будем считать, что, если все множество состояний

представить в виде вектора, то 11) будет компонентой этого вектора с номером $i_1, i_2, \dots, i_n$.

Первый подход. Одношаговый доход системы $\bar{F}$ определяется как функция от соответствующих доходов автоматов $A_1, A_2, \dots, A_n$:

$$|\bar{F}|_{i_1, i_2, \dots, i_n} = \varphi(|\bar{f}_1|_{i_1}, |\bar{f}_2|_{i_2}, \dots, |\bar{f}_n|_{i_n}). \quad (3)$$

В этом случае оптимизация полного дохода, т. е. поиск оптимального стационарного решения, осуществляется методами, описанными в [1].

Например, если у автоматов $A_1, A_2, \dots, A_n$ есть поглощающие состояния, и время жизни всей системы определяется первым тактом, таким, что все автоматы окажутся в поглощающих состояниях, то для времени жизни системы вектор $\bar{F}$ определяется через соответствующие векторы $\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_n$ следующим образом:

$$|\bar{F}|_{i_1, i_2, \dots, i_n} = \max \{ |\bar{f}_1|_{i_1}, |\bar{f}_2|_{i_2}, \dots, |\bar{f}_n|_{i_n} \}. \quad (4)$$

Если же время жизни системы определяется тактом, когда впервые какой-нибудь из автоматов $A_1, A_2, \dots, A_n$ попал в поглощающее состояние, то вместо (4) необходимо использовать соотношение

$$|\bar{F}|_{i_1, i_2, \dots, i_n} = \min \{ |\bar{f}_1|_{i_1}, |\bar{f}_2|_{i_2}, \dots, |\bar{f}_n|_{i_n} \}. \quad (5)$$

Второй подход. Полный доход системы не определяется пошагово. Каждый автомат A_k имеет свой одношаговый доход $\bar{f}_k$ и полный доход $\bar{X}_k$ (при соответствующем управлении), определяемый пошагово, то поведение системы при некотором управлении оценивается через вектор $(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n)$ с помощью некоторой функции

$$|\bar{X}|_{i_1, i_2, \dots, i_n} = \varphi(|\bar{X}_1|_{i_1}, |\bar{X}_2|_{i_2}, \dots, |\bar{X}_n|_{i_n}). \quad (6)$$

Однако, так как система связана, то каждый доход $|\bar{X}_k|$, получаемый автоматом A_k при начальном состоянии, зависит теперь от состояния других автоматов. Поэтому теперь следует вместо вектора $\bar{X}_k$ рассматривать вектор, имеющий размерность, равную количеству состояний всей системы. Тогда задача приобретает следующий вид. Дан один автомат A (вся система рассматривается как один автомат), для которого с помощью управления U пошагово определяется несколько доходов $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n$. Необходимо найти такое управление, чтобы оптимизировать вектор $\bar{X}$, где

$$|\bar{X}|_i = \varphi(|\bar{X}_1|_i, |\bar{X}_2|_i, \dots, |\bar{X}_n|_i) \quad (7)$$

(здесь для автомата A мы использовали обычную линейную нумерацию состояний).

Таким образом, если первый подход не приводит к принципиально

новым задачам (увеличивается лишь размерность искомого вектора), то второй подход порождает новый тип задачи. Можно показать, что эта задача, вообще говоря, не решается итерационным методом и требует определенного перебора. Однако представляют интерес некоторые частные случаи, которые могут встретиться на практике, допускающие использование итерационного метода.

Прежде всего отметим случай, когда функция ψ является линейной (доходы автоматов $A_1, A_2, \dots, A_n$ суммируются с некоторыми весами):

$$\psi([\bar{X}_1]_i, [\bar{X}_2]_i, \dots, [\bar{X}_n]_i) = \sum_{k=1}^n \lambda_k [\bar{X}_k]_i \quad (8)$$

Очевидно, что этот случай сводится к ситуации, возникающей при первом подходе. Действительно, определив для своей системы одношаговый доход:

$$\bar{F} = \sum_{k=1}^n \lambda_k \bar{f}_k \quad (9)$$

с помощью соответствующей линейной комбинации одношаговых доходов, мы можем образовать линейную комбинацию рекуррентных соотношений для пошагового вычисления доходов $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n$, в результате чего получим рекуррентное соотношение для пошагового вычисления дохода $\bar{X}$:

$$\bar{X}_{k+1} = \bar{F}(u) + A(u)\bar{X}_k. \quad (10)$$

Таким образом, задача сводится к задаче, рассмотренной в [1].

Легко решается также случай, когда управление каждым автоматом независимо, а функция ψ является монотонно убывающей или возрастающей по всем своим аргументам.

Перейдем теперь к рассмотрению случая, когда общий сигнал управления автоматами $A_1, A_2, \dots, A_n$ подается не на каждом такте, а в моменты времени, кратные некоторому отрезку τ ($\tau = 0, T, 2T, \dots, kT$). Воздействие управляющего сигнала состоит в том, что оно задает каждому автомату A_k режим работы в течение T тактов. Этот режим может быть трех видов: автомат может работать по собственной программе; автомат может работать по чужой программе (т. е. по программе другого автомата, которому отдано предпочтение); автомат может быть отключенным, т. е. пребывать все T тактов в одном состоянии. Употребленные здесь термины „работать по собственной программе“ и „работать по чужой программе“ требуют пояснения.

Рассмотрим схему, приведенную на рис. 1.

На этой схеме каждый автомат A_k имеет свое управление U_k , получающее информацию о состояниях автомата A_k . Однако непос-

редственной связи от Y_k к A_k нет; все A_k управляются через устройство переключения Π , которое может подключить любое Y_k к любому A_l , либо вообще ничего не подключать к A_l (т. е. отключить этот автомат). Действия переключающего устройства Π осуществляются в соответствии с сигналами, поступающими от общего устройства управления Y , которое через каждые T тактов получает информацию о состояниях всех автоматов $A_1, A_2, \dots, A_n$ и на основании этой информации выдает сигналы устройству Π , устанавливающие соответствующий режим работы всей системы на очередные T тактов.

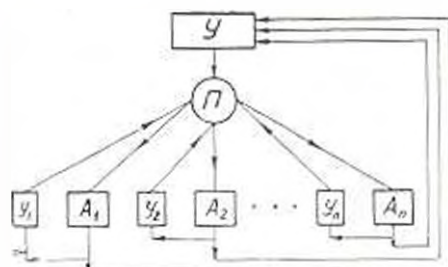


Рис. 1.

Рассмотрим два типа устройства Π . Первый тип осуществляет включение на T тактов одного из автоматов A_k , который работает под воздействием своего управления Y_k (т. е. работает по собственной программе), остальные автоматы отключаются, т. е. каждый из них находится в одном и том же состоянии в течение T тактов. Второй тип осуществляет выбор одного из управляющих устройств Y_l , под воздействием которого в течение T тактов работают все автоматы $A_1, A_2, \dots, A_n$. В последнем случае будем говорить, что автомат A_l функционирует свободно, а все автоматы A_k , где $k \neq l$, лишены свободного функционирования.

Естественно, это не единственные возможные типы устройства Π и соответствующего управления Y . Однако они характерны для многих иерархических системных задач, поэтому и мы выбрали их в качестве объекта исследования.

Рассмотрим задачи управления конечно-автоматной системой, когда в соотношении (7) функция φ определяется следующим образом:

$$\varphi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = \min(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n), \quad (13)$$

т. е. действие всей системы оценивается по автомату, функционирующему „наихудшим“ образом. Если автомат отключен на время T , то будем считать, что его доход за это время равен нулю. Пусть T будет достаточно большое. Тогда имеет смысл пользоваться предельными оценками дохода для автоматов $A_1, A_2, \dots, A_n$ в течение T тактов и искать приближенный алгоритм оптимального управления.

1. Если устройство Π является устройством первого типа, то для каждого автомата A_k следует рассчитать вектор дохода $\bar{X}_k$. Напомним, что размерность вектора $\bar{X}_k$ равна числу состояний автомата A_k — для каждого состояния свой доход. Тогда для работы устройства Y можно рекомендовать следующий алгоритм. По вектору состояний $\bar{S} = (S_1^{(n)}, S_2^{(n)}, \dots, S_n^{(n)})$ определяется вектор доходов состояния $S_k^{(n)}$ автомата A_k ($k = 1, 2, \dots, n$)

$$([\bar{X}_1]_{i_1}, [\bar{X}_2]_{i_2}, \dots, [\bar{X}_n]_{i_n}). \quad (14)$$

Управление Y должно включить тот автомат A_k , у которого соответствующее $[\bar{X}_k]_{i_k}$ наибольшее среди всех компонент вектора (14). Остальные автоматы выключаются.

2. Если устройство Π является устройством второго типа, то поиск оптимального управления Y осуществляется иначе. Для нахождения оптимального управления следует рассматривать взаимодействие каждой пары автоматов (A_k, A_l) , когда автомат A_k является свободно функционирующим, а автомат A_l нет. Пару автоматов можно свести к рассмотрению одного стохастического автомата B_{kl} , состояниями которого являются пары состояний. Для каждого автомата B_{kl} можно рассчитать вектор дохода, решая соответствующую систему уравнений. Тогда управление Y нужно строить следующим образом. По очереди просматриваем все автоматы A_k в качестве свободно функционирующих, т. е. для каждого A_k при заданном состоянии (1) выписывается набор доходов

$$(y_1^{(k)}, y_2^{(k)}, \dots, y_n^{(k)}), \quad (15)$$

где $y_i^{(k)}$ — доход автомата B_{ki} в состоянии $(S_k^{(n)}, S_i^{(n)})$.

Среди компонент вектора (15) находим минимальную компоненту, которую мы обозначим через Z_k . Среди всех Z_k найдем наибольшую. Пусть соответствующий номер автомата — m . Тогда управление Y должно предоставить автомату A_m свободное функционирование.

Если отрезок времени T небольшой, то методика построения оптимального управления Y будет иной. Она будет состоять в переходе к другому масштабу времени: функционирование системы будет рассматриваться не во времени τ , а во времени τ' , где $\tau = \tau' T$.

Если устройство Π принадлежит к первому типу, то для каждого автомата A_k необходимо его рассматривать совместно с Y_k как автономное устройство, выписать его стохастическую матрицу P_k и найти ее степень P_k^T . Тогда все сведется к функционированию автономных автоматов (которые мы обозначим через $D_1, D_2, \dots, D_n$) во времени τ' с матрицами $P_1^T, P_2^T, \dots, P_n^T$. По матрице P_k^T для D_k вычисляется вектор дохода, в данный момент времени τ' по вектору состояний (1) определяется набор доходов для каждого D_k , и включается тот автомат A_k , для которого этот доход наибольший.

Очевидно, этот алгоритм можно рекомендовать для не очень малых значений T . При небольшом отрезке времени T описанный алгоритм будет работать неудовлетворительно, так как будет слишком приближенным. Если T мало и мы хотим найти в точности оптимальное управление, то необходимо не только переход от времени t к времени t' , но и необходимо рассмотрение всей системы как единого автомата. В частности, это относится и к случаю, когда устройство U — второго типа.

Поступило 4.III. 1974

Հ. Խ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Մ. Ն. ԱՎԿԵՅԱՆ

ՎԵՐՋԱՎՈՐ ԱՎՏՈՄԱՏՆԵՐԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻՐԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՄԻ ՔԱՆԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածը նվիրված է վերջավոր ավտոմատների համակարգերի կառավարման խնդիրներին: Գիտվում են բարդ կառավարման համակարգերի պարզեցված երկու վարկած: Այդ վարկածները (մոդելները) վերաբերվում են այսպես կոչված բազմամուկարդակ կառավարվող համակարգերի դասին: Ուսումնասիրվում են տարբեր դեպքեր՝ երբ համակարգի առաջին և երկրորդ մակարդակներում դառնվող ավտոմատները ունեն կառուցվածքային և աշխատանքային տարբեր ցուցանիշներ և բնութագրեր:

Բերված են նման համակարգերի աշխատանքի բնութագրող մի քանի արտահայտություններ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Сарфян Н. Е. Одна задача иерархических систем автоматов. Изв. АН СССР «Техническая кибернетика», № 4, 1968

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. А. ГОРУНЯН, А. Н. ЦАТУРЯН

О ДВИЖЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЫПУЧЕГО
МАТЕРИАЛА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ КОРОННОГО
РАЗРЯДА

Движение мелкозернистых и сыпучих материалов (кварцевый песок, манная крупа, зерновые и т. д.) в трубопроводах и желобах сопровождается разделением электрических зарядов. В подавляющем большинстве случаев процесс зарядки носит несимметричный характер [1], в результате чего материал в целом оказывается униполярно заряженным. Наличие электрического заряда на частицах приводит к взаимному отталкиванию и вызывает некоторую их переориентацию. В итоге плотность упаковки частиц, а следовательно, и насыпной вес сыпучего материала изменяется [2]. Таким образом, плотность электрического заряда сыпучего материала является одной из характеристик его движения.

Роль электрических зарядов в поведении сыпучего материала усиливается при наличии внешнего электрического поля, которое возбуждает дополнительную силу. В сильных полях эта сила может быть значительно больше сил электростатического отталкивания между частицами.

Выявление представительной зависимости движения сыпучего материала от интенсивности взаимодействия его объемного заряда с внешним полем при использовании естественной зарядки трудно осуществимо. Поэтому целесообразно использовать искусственную зарядку, что можно реализовать в электрическом поле коронного разряда. Зарядка сыпучего материала в поле коронного разряда по сравнению с другими способами искусственной зарядки (контактной, факельным разрядом и т. д.) предпочтительна; во-первых, потому, что параметры электрического поля, а следовательно, плотность заряда материала легко регулируются, и, во-вторых, зарядка и взаимодействие с внешним полем происходит одновременно. Кроме того, как будет показано ниже, этот способ зарядки представляет самостоятельный интерес.

Исследование движения сыпучего материала в электрическом поле коронного разряда было проведено для системы коаксиальных цилиндров с радиусами r_0 и R , имеющей следующее конструктивное исполнение (рис. 1). В нижней части бункера 2, изготовленного из изоляционного материала, на съемном дне 3 крепится коаксиальная система цилиндров 4 и 5, между которыми горит коронный разряд. Коронирующий цилиндр 5 токопроводом 6 соединен с отрицательным полюсом вы-

соковольтного выпрямительного устройства 7, положительный полюс которого заземлен. Коронирующий цилиндр 5, в качестве которого была использована латунная проволока диаметром 0,3 мм, натянута по оси цилиндра 4 при помощи двух тонких изоляционных стержней 8, приклеенных к его внутренней поверхности. Под коронирующей системой установлен электромагнитный клапан с горизонтальным ходом,

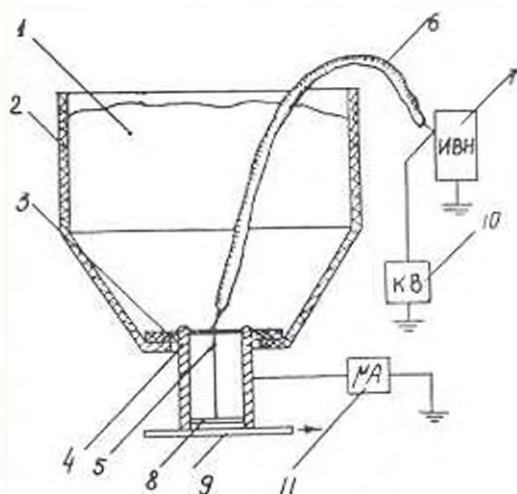


Рис. 1. Схематический вид экспериментальной установки

исполнительным органом которого служит диэлектрическая пластинка 9, приложенная к цилиндру 4. Напряжение, приложенное к коронирующей системе, измеряется киловольтметром 10, ток в разрядной цепи — микроамперметром 11. В качестве сыпучего материала использовалась манная крупа. При закрытом положении электромагнитного клапана манная крупа 1 в количестве 3,6 кг заливается в бункер 2. Высокое напряжение необходимой величины подается на коронирующую систему, и регистрируется ток коронного разряда. После чего включается электромагнитный клапан, который, отодвигая пластинку 9 по направлению стрелки, вызывает истечение сыпучего материала и одновременно включает электросекундомер. В каждом эксперименте регистрируются: приложенное напряжение U , ток в цепи $I_{\text{кр}}$ и время истечения сыпучего материала t . Результаты, полученные для четырех использованных цилиндров, приведены в табл. 1, где l — длина цилиндра.

Прежде всего отметим, что измеряемый ток $I_{\text{кр}}$ складывается из двух составляющих:

$$I_{\text{кр}} = I + I_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где I — ток коронного разряда; $I_{\text{пр}}$ — ток проводимости.

Для оценки значения $I_{\text{пр}}$ исследуемый материал был помещен между электродами Роговского, и для диапазона напряженностей, имеющего место в экспериментах, определялась удельная проводимость γ_1 . Ока-

залось, что в сильных полях γ_1 заметно зависит от напряженности. Полученные результаты хорошо обобщаются линейной зависимостью:

$$\gamma_1 = \gamma_{10} + K \frac{U}{R}, \quad (2)$$

где γ_{10} — удельная проводимость при отсутствии сильного поля (т. е. проводимость в слабом поле); K — коэффициент пропорциональности. Для малой крупы измерения дали: $\gamma_{10} = 0,6 \cdot 10^{-10}$ с.м./м., $K = 1,35 \cdot 10^{-15}$ с.м./в. Ток проводимости определялся как

$$i_{\text{пр}} = \frac{U}{R_{\text{пр}}}. \quad (3)$$

Здесь $R_{\text{пр}}$ сопротивление сыпучего материала в цилиндрическом объеме и вычисляется по выражению [3]:

$$R_{\text{пр}} = \frac{\ln \frac{R}{r_0}}{2\pi\gamma_1 l}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены значения разрядного тока на погонный метр длины цилиндров, вычисленные по (1) с учетом (2) и (4). Величина тока проводимости $i_{\text{пр}}$ оказалась в несколько раз меньше разрядного тока. Этот факт свидетельствует о том, что коронный разряд является определяющим явлением описываемого процесса.

Таблица 1

$R = 12,5 \text{ м.м.}$ $l = 60 \text{ м.м.}$	$U, \text{ кв.}$ $i_{\text{пр}}, \text{ мкА}$ $i, \text{ с/с.к.}$ $i, \text{ мкА/м}$	2.00 0.35 83 5.00	2.45 0.42 95 5.85	2.70 0.74 100 10.9	3.50 0.93 114 13.3	4.50 1.12 136 15.0	5.30 1.35 150 17.8	6.20 1.52 ∞ 19.1	0.00 0.00 66 0.00
$R = 14,5 \text{ м.м.}$ $l = 70 \text{ м.м.}$	$U, \text{ кв.}$ $i_{\text{пр}}, \text{ мкА}$ $i, \text{ с/с.к.}$ $i, \text{ мкА/м}$	3.20 0.45 53 4.88	3.60 0.55 57 5.85	3.90 0.63 62 6.72	4.30 0.74 76 7.58	5.10 0.80 83 7.85	6.20 1.32 95 13.30	7.40 1.67 ∞ 16.10	0.00 0.00 43 0.00
$R = 17,5 \text{ м.м.}$ $l = 80 \text{ м.м.}$	$U, \text{ кв.}$ $i_{\text{пр}}, \text{ мкА}$ $i, \text{ с/с.к.}$ $i, \text{ мкА/м}$	3.40 0.31 30 2.50	4.20 0.43 33 3.25	4.90 0.70 38 6.00	5.80 1.33 43 12.70	7.00 1.61 61 14.6	8.00 1.79 79 15.3	9.50 2.12 ∞ 16.4	0.00 0.00 24 0.00
$R = 22 \text{ м.м.}$ $l = 100 \text{ м.м.}$	$U, \text{ кв.}$ $i_{\text{пр}}, \text{ мкА}$ $i, \text{ с/с.к.}$ $i, \text{ мкА/м}$	7.00 1.10 18 6.7	8.00 1.45 20 8.9	9.00 1.80 23 11.0	10.0 2.10 26 12.5	10.5 2.30 30 13.6	11.0 2.50 36 14.7	11.5 2.40 ∞ 17.9	0.00 0.00 13 0.00

Графическая интерпретация приведенных в табл. 1 результатов представлена на рис. 2 в виде зависимости $K_3(E_{\text{кр}})$. Под K_3 подразуме-

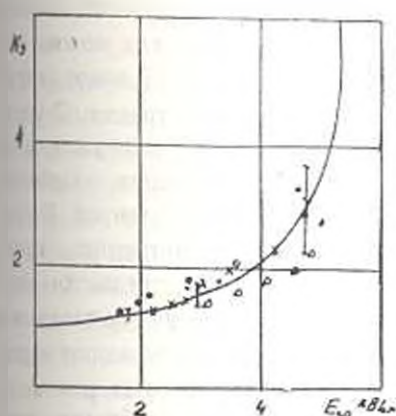


Рис. 2. Зависимость процесса замедления истечения сыпучего материала от интенсивности электрического поля

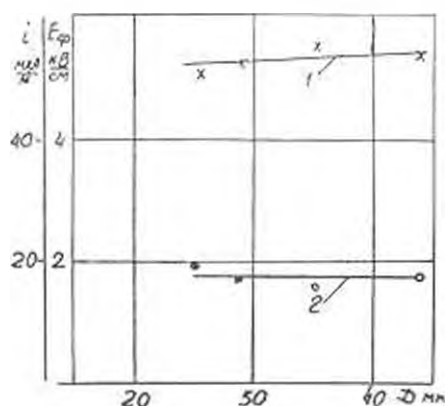


Рис. 3. Характеристики запирающего поля при различных сечениях истечения

ается „коэффициент замедления“, равный отношению времени истечения данного количества материала при наличии поля со средней напряженностью E_{cp} и времени истечения при отсутствии электрического поля. Обработка результатов, полученных для четырех использованных цилиндров, показывает, что с точностью не менее 25% зависимость $K_3(E_{cp})$ можно обобщать. Она оказывается близкой к кубической параболе, что свидетельствует о значительном усилении роли электростатического поля при больших сечениях истечения. Зависимость запирающей ($t = \infty$) напряженности поля E_{cp} от сечения истечения представлена кривой 1 на рис. 3, откуда видно, что запирающее поле весьма слабо зависит от сечения истечения. Небезынтересно отметить, что запирающие потоки сыпучего материала при различных сечениях истечения происходят при практически равных разрядных токах на погонный метр длины цилиндров (кривая 2 на рис. 3). Отметим также, что эти особенности могут оказаться критерияльными для обобщенного описания процесса истечения электризованных сыпучих материалов. Поэтому, в дальнейшем необходимо уточнять и выявлять интервалы сечений и свойства материалов, для которых указанные особенности соблюдаются.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что влияние электрического состояния материала на его движение весьма значительно. Финансовая картина этого влияния сводится к следующему. Плотность заряда сыпучего материала определяет плотность упаковки, которая проявляется в изменении объемной производительности (Q) через площадь (S) поперечного сечения коронирующего промежутка:

$$Q = S v_{cp}, \quad (5)$$

где v_{cp} — средняя скорость движения материала.

Очевидно, что изменение объемной производительности связано изменением $v_{\text{ср}}$, которая обусловлена плотностью заряда. Физическую картину влияния заряда на движение сыпучего материала можно свести к возникновению дополнительного давления на стенки некоронирующего электрода, а также увеличению сил внутреннего трения. С увеличением приложенного к коронирующему промежутку напряжения плотность разряда возрастает, что приводит к усилению взаимодействия как между частицами, так и между частицами и стенкой. В итоге возрастают силы трения. Характер изменения сил внутреннего трения (трение между частицами) весьма сложен и является предметом самостоятельного исследования. Возможно, эти силы по порядку величины не уступают или даже превышают силу трения между материалом и стенкой. Из-за отсутствия более или менее представительных данных по этому вопросу приходится в первом приближении пренебрегать изменением сил внутреннего трения, что, очевидно, вносит существенную погрешность в количественное описание процесса. Следовательно, учет влияния электрически заряженного состояния сыпучего материала на его движение можно осуществить весьма приближенно, который, однако, позволит выявлять определяющие закономерности процесса в целом, качественно подтверждающие характер экспериментально полученных зависимостей.

Пусть давление на стенку, возникшее в результате отталкивающих между заряженными частицами сил, равно p_0 . Тогда сила, действующая на поверхность наружного цилиндра единичной длины, равна

$$p = 2\pi R(p_0 + \Delta p), \quad (6)$$

где Δp — давление незаряженного материала на стенку, которым в первом приближении можно пренебречь.

Сила, вызывающая истечение, очевидно, может быть представлена в виде

$$F_{\text{ис}} = kd, \quad (7)$$

где d — удельный вес сыпучего материала, k — некоторый коэффициент определяемый природой сыпучего материала и конструкцией бункера.

В рамках принятого приближения можно допустить, что силой, ограничивающей истечение, является сила трения $F_{\text{тр}}$ между материалом и стенкой, которая равна

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} P, \quad (8)$$

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент трения.

Истечение материала возможно при

$$p_0 < \frac{kd}{2\pi R k_{\text{тр}}}, \quad (9)$$

Условием запыривания потока будет;

$$p_0 \geq \frac{kd}{2\pi R k_{\text{тр}}}, \quad (10)$$

Обозначим

$$\eta = \frac{F_{\text{эс}}}{F_{\text{тр}}} = \frac{kd}{2\pi Rk_0\rho_0} \quad (11)$$

Очевидно, при прочих равных условиях η определяет среднее значение скорости движения материала $v_{\text{ср}}$, т. е. $v_{\text{ср}}(\eta)$. Допуская независимость коэффициентов k и k_0 от электрического состояния сыпучего материала, можно утверждать, что средняя скорость движения материала в коронирующем промежутке определяется "электростатическим давлением" p_0 . Давление p_0 можно вычислить для упрощенной модели при следующих допущениях: 1) цилиндры бесконечно длинные, 2) частицы имеют сферическую форму, 3) в коронирующей промежутке материал распределен равномерно, 4) исключается электрический контакт как между частицами, так и между частицей и поверхностью электродов, 5) наличие полного объемного заряда и объемного заряда частиц не вызывает существенное изменение электростатического распределения поля.

Первые три допущения правомерны с достаточной точностью. Четвертое допущение приемлемо только для диэлектрических материалов (что и является объектом нашего рассмотрения). Действительно, нераспределение заряда между соприкасающимися частицами практически исключается при их низкой поверхностной проводимости, тем более, что площадь возможного контакта весьма незначительна и по данным [1] составляет 10^{-5} миделево сечения. Пятое допущение вносит определенную неточность*, однако, оно существенно упрощает оценку электростатического давления.

Сила ΔF , имеющая электрическое происхождение и действующая в радиальном направлении на единицу объема сыпучего материала, равна:

$$\Delta F = E\sigma_s \quad (12)$$

Плотность объемного заряда сыпучего материала ρ_s для установившегося режима в рамках допущений (2)÷(4) определяется как [4]:

$$\rho_s = 3\varepsilon_0\varepsilon_s \sigma F \quad (13)$$

где ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м; ε_s — удельная поверхность материала, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Значение σ_s можно определить в рамках допущения равномерности распределения сыпучего материала в коронирующем промежутке, что и должно иметь место. Действительно, из-за высокой объемной концентрации перемещение частиц в коронирующем промежутке под действием сил неоднородной поляризации исключается.

* Снятие ограничения, вносимого пятым допущением, приводит к тому, что процесс должен быть описан уравнением Пуассона. Однако граничные условия и фактор усиления поля в дисперсионной среде, необходимые для решения этого уравнения, остаются пока неопределенными.

а наличие некоторой ориентации частиц не может вызывать их перераспределение. Тогда, согласно [5],

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \left[1 + 3f \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + 2\gamma_2 - f(\gamma_1 - \gamma_2)} \right], \quad (14)$$

где γ_1, γ_2 — проводимости частиц сыпучего материала и среды; f — объемная концентрация сыпучего материала.

Сила, действующая на цилиндрический элемент единичной длины с толщиной стенки dr , будет:

$$dF = E p_0 2\pi r dr = 6\pi \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon E^2 r dr, \quad (15)$$

Давление на стенку от силы dF равно:

$$dp_0 = 3\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon E^2 dr. \quad (16)$$

Интегрируя (16), получаем значение давления на стенку:

$$p_0 = 3\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon \int_{r_0}^R E^2 dr \quad (17)$$

В выражении (17) напряженность поля играет роль интегральной характеристики, поэтому с учетом пятого допущения ее значение может быть найдено из уравнения:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0.$$

Решение уравнения Лапласа для цилиндрической системы в рамках первого допущения дает:

$$E = \frac{U}{\ln \frac{R}{r_0}} \cdot \frac{1}{r}.$$

Тогда из (17) получаем:

$$p_0 = -3\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon \frac{U^2}{\ln^2 \frac{R}{r_0}} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r_0} \right).$$

Учитывая, что $r_0 \ll R$, имеем:

$$p_0 = 3\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon \left(\frac{U}{\ln \frac{R}{r_0}} \right)^2 \cdot \frac{1}{r_0}. \quad (18)$$

Из (18) следует, что P_0 зависит от приложенного напряжения, а следовательно, от средней напряженности по закону квадратной параболы. Таким образом, эта зависимость несколько слаба, нежели экспериментальная зависимость, что, по-видимому, обусловлено учетом сил

внутреннего трения и искажения поля объемным зарядом понов и частиц.

Приведем численный анализ уравнения (18) для условий эксперимента. Прежде всего необходимо определить ϵ_2 и α .

Для воздуха γ_2 имеет порядок 10^{-15} *сим/м*. Таким образом, $\gamma_1 \gg \gamma_2$. Тогда (14) упрощается, и

$$\epsilon_2 = \epsilon_1 \frac{1 + 2f}{1 - f} = 3,76,$$

где $f=0,48$ — измеренное значение объемной концентрации; $\epsilon_1=1$ — относительная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Микроскопический анализ гранулометрического состава манной крупы дал средний радиус частиц, равный 270 *мкм*. Тогда удельная поверхность материала

$$\alpha \approx \frac{3f}{a} = 5330 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Подставляя численные значения в (18), получаем:

$$p_0 = 0,533 \cdot 10^{-9} \left(\frac{U}{R} \right)^2 \frac{1}{r_0}.$$

Для условий эксперимента p_0 составляет (0,5–7) *Г/см²*, что оказывается достаточным для замирания потока сыпучего материала.

Выводы

1. Внешнее электрическое поле ограничивает текучесть электризованных сыпучих материалов.
2. Основной силой, препятствующей истечению, является электростатическое давление на стенку, которое зависит от средней напряженности по закону параболы.
3. Интенсивность коронного разряда, даже в начальной стадии, оказывается достаточной для замирания потока движущегося сыпучего материала.

АРИТНИИ — механизация и электрификация
сельского хозяйства

Поступило 15.IV.1975.

2. А. А. МЕЛНИКОВ, А. П. СЕДУНОВ

ՊՍԱԿԱԶԵԿ ՊԱՐՊՄԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԱՇՏՈՒՄ ՍՈՐՈՒՆ ՄԵԿՈՒՍԻՉ
ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՇԱՐՔՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Պարզաբանվում է էլեկտրական լիցքերի պերր սորուն նյութերի շարժման
էկզ. ջուլը է տրված, որ մասնիկների միջև վանող ուժերի անկախությունը

պատճառ է հանդիսանում պատերի վրա էլեկտրաստատիկ ճնշման առաջացման որով էլ պայմանավորվում է սորուն նյութերի հոսքի զանգազեցումը: Բերված են փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները, որոնց ընդհանրացումը տալիս է դրանի մեջ հոսքի զանդաղման երևույթի բանական կոլմը: Փորձնական արդյունքները ուղեկցվում են տեսական հաշվարկներով, որոնք կատարված են որոշ հիմնավորված ենթադրություններով:

Փորձարարական ու տեսական հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ սորուն նյութերի հոսքի զանդաղումը կախված է էլեկտրական դաշտի ինտենսիվությունից բառականի պարաբոլի օրենքով, և սորուն նյութերի շարժման օրինաչափությունները ուսումնասիրելիս էլեկտրական ուժերի հաշվառքը անհրաժեշտ է:

ЛИТЕРАТУРА

1. Гей Л. Г. Статистическая электризация, [ЭИ], 1963.
2. Заявка на патент ФРГ № 1773919.
3. Матвеев Л. И. Электродинамика и теория относительности. Изд. «Высшая школа», 1964.
4. Цатурян А. Н. О поведении дисперсион фазы в электрическом поле коронации рафин для «Пия ВУЗ-ов СССР Физика», № 4, 1969.
5. Карапетян М. Л. Диэлектрическая проницаемость дисперсион системы в переходном процессе установления электрического поля, «Электричество», № 7, 1973.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Р. М. МИРЗАХАНИЯН, И. Х. ДАНИЕЛЯН

НЕОДНОРОДНОЕ ПОРШНЕВОЕ ПСЕВДООЖИЖЕНИЕ
ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ГАЗОМ

Аппараты, работающие в псевдооживленных системах газ—твердые частицы, имеют широкое применение в различных отраслях промышленности. Как известно [1], когда оживляющим агентом является газ, наблюдается так называемое неоднородное псевдооживление твердых частиц в турбулентном или поршневом режиме. Поршневое псевдооживление имеет место при сравнительно малых соотношениях диаметров аппарата (D) и частиц (d) и в достаточно широких слоях сыпучего материала [1]. В настоящей заметке дана модель неоднородного поршневого псевдооживления в вертикальной колонке с целью ее дальнейшего применения для расчета пневмотранспортных линий сыпучих материалов, в частности, кварцевого песка.

Картина поршневого псевдооживления представлена на рис. 1, где темные участки представляют собой сгустки частиц—«поршни», с объемной концентрацией твердых частиц φ_0 , равной концентрации

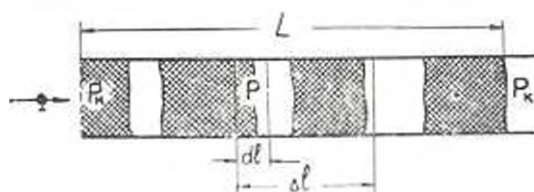


Рис. 1

высокого неподвижного слоя, которые непрерывно движутся и расширяются в верхней части колонки. Часть подаваемого в колонку газа проходит через поры поршней со скоростями, обусловленными перепадом давления в поршнях ΔP , согласно следующему уравнению:

$$\Delta P = \lambda \frac{\Delta l_0}{d} \frac{u^2 \rho}{2}, \quad (1)$$

где λ —коэффициент трения; Δl_0 —длина поршня; d —эквивалентный диаметр пор поршней; u —скорость газа, проходящего сквозь поршни, относительно частиц, рассчитанная на все сечение колонки; ρ —плотность газа.

Скорость u можно выразить через скорость газа в порах поршней (w) и скорость движения поршней ($\dot{z}$) так:

$$u = (w - \dot{z})(1 - \varphi_0). \quad (2)$$

Другая часть подаваемого в колонку газа (сверх пропускных способностей поршней) движется вверх по слою в виде пузырей, диаметр которых при поршневом псевдоожиге равен диаметру колонки, со скоростью β .

Рассмотрим участок длиной Δl в слое неоднородного поршневого псевдоожига (рис. 1). Длина Δl является суммой длин поршней (Δl_n) и пузырей (Δl_0) на этом участке, т. е.

$$\Delta l = \Delta l_n + \Delta l_0. \quad (3)$$

Общий расход газа, проходящего через этот участок Q является суммой расходов газа сквозь поршни Q_n и в виде пузырей Q_0 этого же участка:

$$Q = Q_n + Q_0. \quad (4)$$

Δl_0 и Q_n определяются следующими выражениями:

$$\Delta l_0 = \frac{Q_0 \Delta l}{\beta F}, \quad (5)$$

$$Q_n = \omega F (1 - \varphi_0). \quad (6)$$

Перепад давления ΔP на участке Δl можно определить как [2]:

$$\Delta P = \Delta P_n + \Delta P_t, \quad (7)$$

где ΔP_t — потери давления на преодоление веса слоя поршней длиной Δl_n ; ΔP_n — потери давления на трение движущихся поршней о стенки колонки;

$$\Delta P_n = \gamma_1 \varphi_0 \Delta l_n; \quad (8)$$

$$\Delta P_t = \frac{K \gamma^m}{D^e} \cdot \Delta l_n. \quad (9)$$

В этих выражениях удельная масса твердых частиц (γ_1), коэффициент K и показатели m и e для каждого сыпучего материала определяются экспериментально.

Как показали наши исследования, скорость движения поршней и пузырей (3) в вертикальной колонке довольно точно можно выразить уравнением следующего вида

$$\beta = C \left(\frac{Q}{F} - u_0 \right)^x, \quad (10)$$

где u_0 — скорость начала псевдоожига твердых частиц;

C , x — коэффициент и показатель, значения которых для каждого сыпучего материала определяются экспериментально.

Напишем уравнения (1) и (7) в дифференциальном виде, учитывая (4), (6), (8) и (10), для элементарного участка dl , где давление P и скорость газа u .

$$dP = \frac{\rho_k P_k}{2P_k d_s} dl_n, \quad (11)$$

$$dP = \left[\gamma_1 \gamma_0 + \frac{K}{D^e} \left| C \left(\frac{Q_k P_k}{P F} - u_0 \right)^x \right|^m \right] dl_n, \quad (12)$$

где ρ_k , P_k , Q_k — плотность, давление и расход газа в верхнем сечении слоя.

Решением этой системы уравнений одним из численных методов, в которой переменными являются P и l_n , можно определить давление и скорость газа в любом сечении колонки, над которым суммарная длина поршней равна l_n . Принимая l_n равной высоте L_n неподвижного неподвижного слоя всех частиц в колонке, можно определить давление P_n и скорость газа в нижнем сечении слоя.

Совместным решением уравнений (2)–(6) и (10), подставляя средние значения Q и u для данного участка, получим выражение (13), по которому можно определить среднюю высоту псевдооживленного слоя Δl .

$$\Delta l = \left[(2 - \gamma_0) - \frac{\frac{Q}{F} - u}{C \left(\frac{Q}{F} - u_0 \right)^x} \right]^{-1} \Delta l_n, \quad (13)$$

Точность приведенных уравнений была проверена экспериментом псевдооживления кварцевого песка в колонке диаметром $D = 37,4$ мм (средний диаметр частиц песка $d_{cp} = 0,242$ мм; $\gamma_1 = 2640$ кг/м³; $\gamma_k = 0,53$; $K = 580$; $m = 1$; $e = 0,31$; $C = 0,555$; $x = 0,89$; $u_0 = 0,726$ м/сек). Экспериментально найдено, что для кварцевого песка уравнение (1) имеет вид:

$$\Delta P = (1266,7 + 1835 u) \Delta l, \text{ кг/м}^2, \quad (u > u_0) \quad (14)$$

При $L_n = 1$ м, $Q_k = 0,000375$ м³/сек и $P_k = 9250$ кг/м² расчетное значение давления по уравнению (12) получается $P_n = 10902,7$ кг/м². Из уравнений (14) и (12) определяем среднее для всего слоя значение скорости $u = 0,209$ м/сек, а уравнением (13) — высоту псевдооживленного слоя $L = 1,24$ м. Экспериментальные значения P_n и средней высоты псевдооживленного слоя L с достаточной точностью совпадают с расчетными данными.

ИОХ АН АрмССР

Поступило 24.11.1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельман Н. И., Министейн В. Г., Киши В. Б. Основы техники псевдооживления. Изд. «Химия», М., 1967.
2. Айрапетян Р. М., Гаспарян А. М. «Известия АН АрмССР, серия технич. наук», т. XXI, № 3, 1968.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Н О ТОКМАԼԵԿԻ

К ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ПЛАВНЫХ
ПЕРЕЛОМОВ ОТКРЫТЫХ РУСЕЛ

1 Дифференциальное уравнение неравномерного движения жидкости в открытых руслах, имеющее вид

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i_0 - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} \left(1 - \frac{\alpha C^2 R}{g \omega} \frac{\partial \omega}{\partial l} \right)}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial h}} \quad (1)$$

относится к случаям малых геометрических уклонов. При этом живое сечение заменяется вертикальным сечением потока, а геометрический уклон настолько мал, что можно принимать $i_0 = \sin \varepsilon = \operatorname{tg} \varphi$; $\cos \varepsilon = 1$. Такая постановка в обычных каналах приводит к незначительной ошибке.

В ряде случаев участки каналов могут иметь весьма большие прямые (быстротоки) и обратные (консольные перепады) уклоны. Для этих случаев надо отказаться от указанной выше расчетной схемы и живые сечения потока принять нормальными ко дну русла с глубиной h (рис. 1).

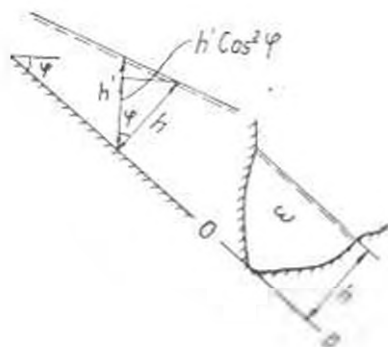


Рис. 1

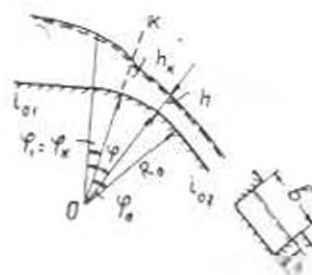


Рис. 2

В данной постановке, поступая аналогично выводу дифференциального уравнения неравномерного движения [1], дифференциальное уравнение движения получается в виде [2]

$$\frac{dh}{dl} = \frac{\sin \varphi - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} \left(1 - \frac{\omega C^2 R}{g \omega} \frac{d\omega}{dl} \right)}{\cos \varphi - \frac{\alpha Q^2}{g \omega^2} \frac{d\omega}{dh}} \quad (2)$$

Легко убедиться, что структура уравнения (2) ничем не отличается от структуры (1), и все известные методы приближенного интегрирования (1) пригодны и для (2).

На наш взгляд в современных условиях надо отказаться от всех существующих, зачастую с грубыми допущениями, примитивных и трудоемких методов расчета, предпочитая интегрирование (1) и (2) на ЭВМ, что более точно и проще.

Наши исследования показали, что в результате интегрирования (2) значения h и h' (см. рис. 1) заметно отличаются только при глубинах, близких к критической. Однако из этого не следует, что кривые свободной поверхности вне этой области будут одинаковые, так как h' откладывается вертикально, а h — по нормали, и отклонение их ординат примерно составляет $1 - \cos^2 \varphi$, что значительно при больших уклонах.

2. Когда уклон русла резко изменяется, переходя от меньшего критического к большему, то теоретически в сечении перелома образуется критическая глубина, и кривая свободной поверхности типа b_* асимптотично приближается к нормальной глубине.

Когда перелом дна осуществляется плавной кривой значительного радиуса, то в начале кривой не устанавливается критическая глубина, так как в этом сечении l_0 еще меньше критического.

По ходу движения уклон русла возрастает, и когда $l_0 = l_k$ имеем $h = h_k$. При больших уклонах критическая глубина определяется из уравнения

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega^3 \cos \varphi}{B} \quad (3)$$

Расход, выраженный через гидравлические элементы, соответствующие критическому уклону, будет:

$$Q = \omega C \sqrt{R \sin \varphi} \quad (4)$$

При прямоугольном сечении русла выражения (3) и (4) примут вид:

$$h = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2 \cos \varphi}}; \quad Q^2 = \frac{b^2 h^{2y+3} \sin \varphi}{n^2 \left(1 + 2 \frac{h}{b} \right)^{2y+1}} \quad (5)$$

где y — показатель в формуле Павловского [1].

Характерно, что в (5) не участвуют радиус кривизны и уклоны участков.

Решая систему (5), определяется место критического сечения φ_k и значение критической глубины h_k (рис. 2). Надо отметить, что точное определение φ_k и h_k очень важно, так как здесь кривая свободной поверхности имеет точку перегиба и происходит изменение характера кривой. Полученные значения φ_k и h_k являются исходными координатами для построения кривой свободной поверхности в спокойном и бурном режимах движения.

В случае $i_{02} < \sin \varphi_k$ глубина не доходит до критической и поток остается спокойным, при $i_{01} > \sin \varphi_k$ поток в начальном сечении имеет глубину меньше критической и на всех участках режим бурный.

3. Рассмотрим переходный участок призматического прямоугольного русла от $i_{01} < i_k$ к $i_{02} > i_k$ при плавном переходе для окружности радиуса R_0 (центральный угол φ_0). Для составления дифференциального уравнения движения удобно за переменные принять: φ — угол между вертикалью и данным сечением, h — глубина потока по нормали.

$$\text{Учитывая, что } \omega = bh; \quad \gamma = b + 2h; \quad R = \frac{h}{1 + 2 \frac{h}{b}}; \quad C = \frac{1}{n} R \gamma;$$

$$dl = R_0 d\varphi; \quad \frac{d\omega}{dl} = 0; \quad \frac{d\omega}{dh} b,$$

из (2) получим:

$$\frac{dn}{d\varphi} = R_0 \frac{\sin \varphi - \frac{Q^2 n^2}{b^2 h^{2y+1}} \left(1 + \frac{2h}{b}\right)^{2y+1}}{\cos \varphi - \frac{\alpha Q^2}{g b^2 h^3}} \quad (6)$$

Граничными условиями будут: $\varphi = \varphi_k; h = h_k$.

Интегрируя (6) на ЭВМ в пределах от φ_k до $\varphi_k + \varphi_0$, получим координаты кривой свободной поверхности.

На рис. 3 показана теоретическая кривая свободной поверхности

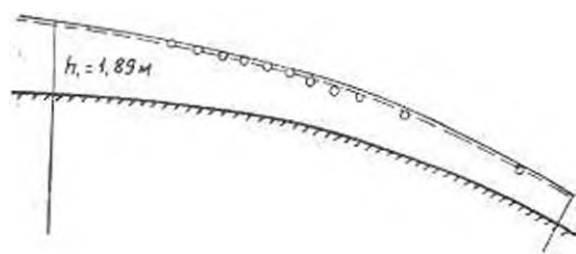


Рис. 3

при следующих исходных данных: $Q = 46,8 \text{ м}^3/\text{сек}$; $b = 6 \text{ м}$; $R_0 = 30 \text{ м}$; $\varphi_0 = 0,4517$; $i_{01} = 0,004$; $i_{02} = 0,49$; $n = 0,017$; $\alpha = 1,1$; $2y = 0,391$; $\varphi_* = 0,00397$; $h_* = 1,89 \text{ м}$. Там же кружочками показаны опытные точки, полученные на модели. Среднеквадратичное отклонение глубин составляет 3,2%.

4° Пусть ширина прямоугольного канала (рис. 4) линейно рас-

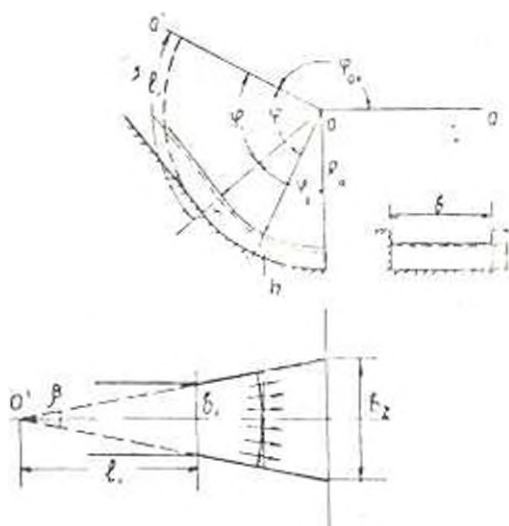


Рис. 4.

ширяется по длине криволинейного участка радиуса R_0 (центральный угол φ_0). Для построения кривой свободной поверхности здесь удобно пользоваться координатами φ и h . За начало отсчета угла φ (рис. 4) принимаем линию мысленного пересечения боковых бортов $O-O'$ (которая проходит через центр кривизны). Тогда для гидравлических элементов получим: $b = \vartheta R_0 \varphi$; $s = \vartheta R_0 \varphi^2$; $l = \vartheta R_0 \varphi + 2h$.

$$R = \frac{h}{1 + \frac{2h}{\vartheta R_0 \varphi}}; \quad C = \frac{1}{n} \left(\frac{h}{1 + \frac{2h}{\vartheta R_0 \varphi}} \right)^{\frac{2}{3}}; \quad \frac{d\varphi_0}{dl} = \vartheta h; \quad \frac{d\varphi_0}{dl} = \vartheta R_0 \varphi,$$

где $\vartheta = \frac{b_2 - b_1}{R_0 \varphi_0}$ — центральный угол в плане.

Учитывая эти преобразования, уравнение (2) получит вид:

$$\frac{dh}{d\varphi} = \frac{R_0 \cos(\varphi_{01} + \varphi) + \frac{\alpha Q^2}{g \vartheta^3 R_0^3 \varphi^3 h^3} \left| \frac{g n^2 R_0}{\alpha h^{2/3}} \left(1 + \frac{2h}{\vartheta R_0 \varphi} \right)^{2\alpha-1} \frac{h}{\varphi} \right|}{\sin(\varphi_{01} + \varphi) + \frac{\alpha Q^2}{g \vartheta^3 R_0^3 \varphi^3 h^3}} \quad (7)$$

где φ_{01} — угол между начальным сечением и линией отсчета $O-O'$.

Интегрируя (7) на ЭВМ от φ_1 до $\varphi_1 - \varphi_0$ (где $\varphi_1 = \frac{b_1}{3R_0}$), получим координаты кривой свободной поверхности.

Пример. Построить кривую свободной поверхности при исходных данных: $Q = 112 \text{ м}^3/\text{сек}$; $h_1 = 0,85 \text{ м}$; $\varphi_0 = 0,4556$ ($26^\circ 06' 34''$); $R_0 = 40 \text{ м}$; $n = 0,017$; $\alpha = 1,1$; $b_2 = 8,04 \text{ м}$; $b_1 = 6,0 \text{ м}$.

Определяем параметры: $\beta = 0,119$; $\varphi_1 = 1,340$; $\varphi_{01} = 2,916$; $\varphi_2 = 1,79$; $2y = 0,391$.

Интегрируя (7) на ЭВМ, получаем координаты кривой свободной поверхности, приведенные в табл. 1 (где x — длина горизонтальной проекции дуги).

Таблица 1

φ	1.34	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.79
$x, \text{ м}$	0	1.81	4.05	5.95	7.87	9.80	11.80	13.80	17.40
$h, \text{ м}$	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70	0.68	0.67	0.64

Выводы

1. При гидравлическом расчете каналов больших уклонов или с криволинейным дном исходным надо принимать дифференциальное уравнение (2) а не (1).

2. Граничными условиями интегрирования (2) для прямоугольных русел с криволинейным дном являются корни системы (5).

3. Кривую свободной поверхности для призматического и непризматического участков с криволинейным дном удобно получить с помощью интегрирования (2) на ЭВМ, применяя в качестве координат центральный угол φ и глубину потока по нормали h .

ГрПИ им. К. Маркса

Поступило 29 I 1975.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богомолов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика, М., 1965.
2. Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов, М., 1969.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Լ. Ե. ՈՂԵԿ ԿՄԻ

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОЙ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО
ПРОФИЛЯ РУСЛА РЕКИ НА ЕГО ПОВОРОТЕ

Расчет устойчивой формы поперечного сечения русла реки на его повороте можно произвести, используя условие динамического равновесия частицы, лежащей на откосе водовода и находящейся под действием собственного веса, силы трения и динамических сил, возникающих от продольных и поперечных скоростей в придонном слое потока. Исходя из этого и используя условия неразрывности скоростей, многими исследователями [2—4] получено дифференциальное уравнение устойчивой формы поперечного сечения русла на его повороте.

Наша цель — произвести расчет по существующим методам для конкретных условий местности, сопоставить результаты теоретических расчетов с натурными (модельными) данными и на этой основе сделать соответствующие практические выводы.

Дифференциальное уравнение устойчивой формы русла на повороте водовода можно представить в следующем виде [2]:

$$\frac{dh_1}{dx_1} = \frac{b}{m_0 h_m} \left[-\frac{v_x}{v} h_1 + \sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{v_x}{v} \right)^2 - \left(\frac{v_h}{v} \right)^2 \right] h^2} \right], \quad (1)$$

где $h_1 = h_1/h_m$, $x_1 = x/b$ — относительные координаты, которые изменяются в пределах от 0 до 1 (см. рис. 1); b — полуширина русла по урезу; h_m — максимальная глубина в русле;

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_h^2 + v_z^2}, \quad (2)$$

v_z — продольная скорость в данной точке течения; v_x — поперечная горизонтальная скорость; v_h — вертикальная скорость; m_0 — коэффициент естественного откоса грунта под водой.

Введем обозначения:

$$\frac{b}{m_0 h_m} = D; \quad \frac{v_x}{v} = k_1; \quad \frac{v_h}{v} = k_2; \quad n_1 = 1 - k_1^2 - k_2^2, \quad (3)$$

С учетом (3) уравнение (1) примет вид:

$$\frac{dh_1}{dx_1} = D \left[-k_1 h_1 + \sqrt{1 - n_1 h_1^2} \right], \quad (4)$$

откуда

$$x_1 = \frac{1}{D} \int \frac{dh_1}{-k_1 h_1 \pm \sqrt{1 - n_1^2 h_1^2}} + C, \quad (5)$$

где C — постоянная интегрирования, определяемая из граничного условия. При постоянных значениях k_1 и n_1 выражение (5) можно представить в следующем виде:

$$x_1 = \frac{1}{D} \left[\frac{n_1}{n_1^2 + k_1^2} \arcsin n_1 h_1 - \frac{k_1}{n_1^2 + k_1^2} \ln(\sqrt{1 - n_1^2 h_1^2} \pm k_1 h_1) \right] + C,$$

что и есть искомая функция поперечного профиля русла в несвязанных грунтах на повороте водовода.

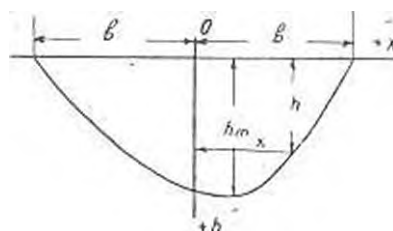


Рис. 1 Расчетная схема.

Для определения параметра C используем условия:

$$h_1 = 0 \quad x_1 = 1 \quad (\text{для правого откоса}); \quad (6)$$

$$h_1 = 0 \quad x_1 = -1 \quad (\text{для левого откоса}). \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) получаем: для правого откоса $C = 1$, для левого откоса $C = -1$.

Для функции $x_1 = x_1(h_1)$ получены следующие зависимости:
для левого откоса

$$x_1 = \frac{1}{D} \left[\frac{n_1}{n_1^2 + k_1^2} \arcsin n_1 h_1 - \frac{k_1}{n_1^2 + k_1^2} \ln(\sqrt{1 - n_1^2 h_1^2} - k_1 h_1) \right] - 1; \quad (8)$$

для правого откоса

$$x_1 = \frac{1}{D} \left[\frac{n_1}{n_1^2 + k_1^2} \arcsin n_1 h_1 - \frac{k_1}{n_1^2 + k_1^2} \ln(\sqrt{1 - n_1^2 h_1^2} + k_1 h_1) \right] + 1. \quad (9)$$

Для расчета устойчивой формы русла по формулам (8) и (9) необходимо задаться распределением продольных и поперечных скоростей. Расчет поперечного профиля русла нами произведен при следующих исходных данных (взяты из модельного русла, которое нами исследовалось):

$$b = 0,3 \text{ м}; \quad h_m = 0,1 \text{ м}; \quad m_0 = 3; \quad D = 1; \quad k_1 = 0,9; \quad k_2 = 0,1;$$

$$n_1 = 0,425; \quad \frac{n_1}{n_1^2 + k_1^2} = 0,43; \quad \frac{k_1}{n_1^2 + k_1^2} = 0,91.$$

Последовательность расчета по формулам (8) и (9) приведена в табл. 1. Результаты расчетов графически представлены на рис. 2.

Таблица 1

h_1	$\frac{n_1}{n_1^2 + k_1^2} \arcsin \frac{n_1 h_1}{k_1}$	$\frac{k_1}{n_1^2 + k_1^2} \ln \left(\sqrt{1 - \frac{n_1^2 h_1^2}{k_1^2}} - \frac{n_1 h_1}{k_1} \right)$	x_1 (левый откос)	$\frac{k_1}{n_1^2 + k_1^2} \ln \left(\sqrt{1 - \frac{n_1^2 h_1^2}{k_1^2}} - \frac{n_1 h_1}{k_1} \right)$	x_1 (правый откос)
0	0	0	-1	0	1
0.1	0.018	-0.086	-0.90	0.078	0.90
0.2	0.041	-0.187	-0.77	0.146	0.81
0.3	0.055	-0.288	-0.65	0.204	0.74
0.4	0.074	-0.411	-0.52	0.270	0.66
0.5	0.095	-0.577	-0.33	0.328	0.58
0.6	0.110	-0.785	-0.13	0.376	0.51
0.7	0.130	-1.030	0.16	0.417	0.45
0.8	0.148	-1.380	0.53	0.460	0.39
0.9	0.169	-1.970	1.14	0.500	0.33
1.0	0.188	-3.000	3.10	0.536	0.28

Чтобы получить картину формирования русла на закруглении размываемого водовода, в гидравлической лаборатории ИИИ водных проблем и гидротехники ММиВХ АрмССР нами были поставлены опыты. Для формирования модели был использован немзовый песок.

Опыты проводились в лотке прямоугольного поперечного сечения. Песчаное дно водовода в поперечном направлении было горизонтальное, а в продольном — с уклоном $i = 0,006$. Модель имела ширину 60 см, высоту 40 см, длину 1,7 м, угол поворота 180° с радиусом закругления 4 м. Отношение глубины к ширине в наших опытах менялось в пределах $b/h = 0,13 \div 0,21$. Расход изменялся в широких пределах, для рассмотренного выше примера составлял 0,17 л/сек.

Продолжительность каждого опыта определялась отрезком времени, в течение которого происходила стабилизация руслового процесса, т. е. прекращался размыв и устанавливалась устойчивая форма русла на рабочем участке модели. В наших опытах это время ranged 45—50 часам.

Поперечные профили русла и скорости потока измерялись в нескольких сечениях модели, расположения которых приведены на рис. 2. На рис. 2 пунктирной линией нанесены устойчивые формы русла, полу-

ченные из опытов, а сплошной линией—расчетные формы русла по данным табл. 1.

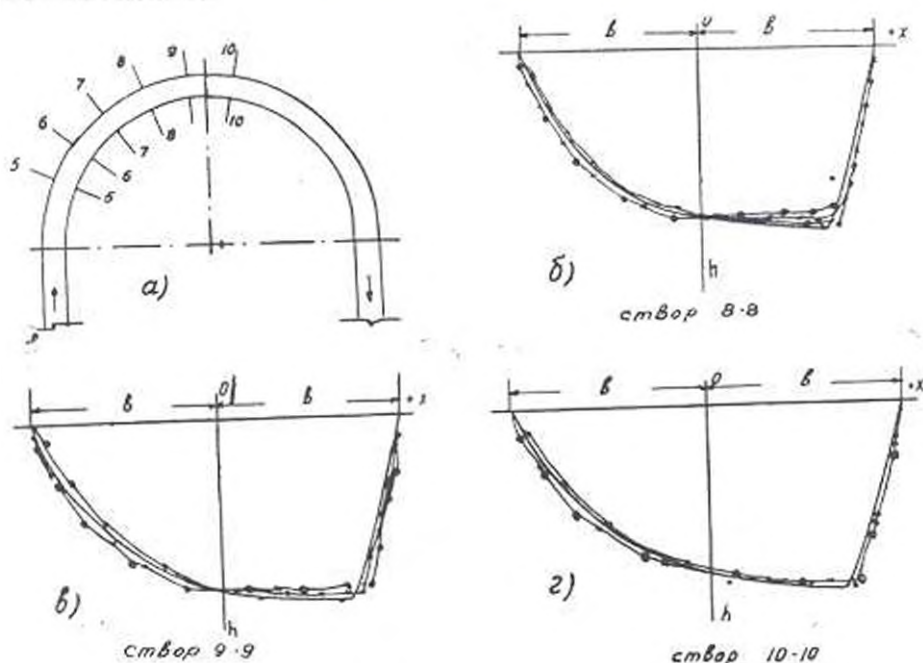


Рис. 2. План и поперечные профили деформированных русел.

а — схема расположения створов;

б, в, г — сопоставление расчетных и опытных данных.

Как видно из рис. 2, результаты экспериментальных и теоретических исследований дают хорошее совпадение. Аналогичное сопоставление данных опытов и теоретических расчетов было произведено и при других исходных данных, которые существенно не отличаются от приведенных выше показателей. Здесь мы не приводим расчеты, так как во всех случаях имеем аналогичную картину—совпадение теоретических расчетов с данными опытов. Сопоставление результатов теоретических расчетов с данными натуральных речных русел представляло бы, конечно, большой интерес. К сожалению, такими данными мы не располагаем. Однако это не может существенно повлиять на выводы, сделанные выше, так как качественная картина в натуральных руслах вполне совпадает с данными теоретических расчетов.

ЕрПИ им. К. Маркел

Поступило 11.V.1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Анянян А. К. Движение жидкости на повороте водовода. Ереван, 1957.
2. Похрипян М. С. Поперечные профили естественных русел. «Известия АН АрмССР (серия Т. II.)», т. XI, № 6, 1958.
3. Розовский И. Л. К вопросу об устойчивой форме русла на закруглении канала. ДАН УССР, № 1, 1955.
4. Ибад-заде Ю. А. Построение устойчивого профиля русла. «Гидротехническое строительство», № 12, 1952.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Р. М. ГАБРИЕЛЯН

К УЧЕТУ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМОТОРОВ В ИНФОРМАЦИИ
ДЛЯ РАСЧЕТОВ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При решении задач оптимизации режимов энергосистем с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов (K_i) существуют два возможных способа формирования матрицы комплексных проводимостей $|Y|$ исследуемых систем. Первый из них предусматривает формирование одной несимметричной матрицы. Несимметрия возникает из-за K_i . Во втором случае система представляется двумя матрицами. В одной из них учитываются сетевые элементы, эта матрица является симметричной. Вторая матрица представляет только комплексные коэффициенты трансформации трансформаторов. Схема замещения, соответствующая второму способу, показана на рис. 1. Вытекает

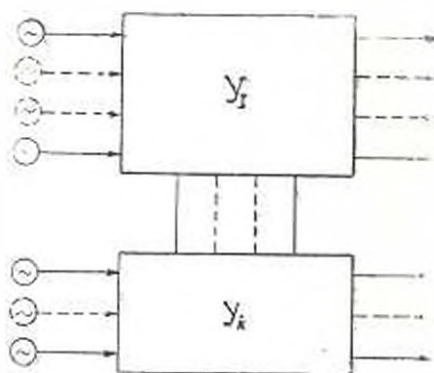


Рис. 1.

задача — какой из этих способов является более эффективным как при решении оптимизационных задач, так и задач потокораспределения? Решение этой задачи зависит от результатов анализа способов формирования указанных матриц и их эквивалентирования.

Целью настоящей заметки является анализ формирования этих матриц и выбор более оптимального способа. Здесь в качестве расчетной рассматривается схема, содержащая до 200 узлов при наличии в них до 10 трансформаторов с K_i .

Число вычислительных операций для симметричных по главной диагонали матриц при эквивалентировании определяется по формуле [1, 2]

$$N = \frac{1}{2} m(m-1) + \frac{1}{2} c(c-1) + \sum_{i=1}^{c+1} (n-i)(n-i-1) + \sum_{i=1}^{c+1} (n-i), \quad (1)$$

где n — число узлов исходной схемы; m — число пар полюсов эквивалентного пассивного многополюсника; c — количество шагов эквивалентирования до эквивалентного пассивного многополюсника

Однако при учете ветви с K_T из-за несимметричности исходной $[Y]$ матрицы число вычислительных операций увеличивается на величину Δ_j , которую для одного K_T можно рассчитать по формуле

$$\Delta_j = \frac{1}{2} m(m-1) + \frac{1}{2} (j-m)(j-m+1) + \sum_{i=1}^{j-m} (j-i)(j-i-1) + \sum_{i=1}^{j-m} (j-i), \quad (2)$$

где j — номер шага с которого участвует в эквивалентировании ветвь с K_T .

Если на k -ом шагу эквивалентирования число ветвей с K_T увеличивается на α , то число вычислительных операций увеличивается на Δ_k , рассчитываемой по формуле (2) с условием $j = k$ и т. д.

В конечном счете число вычислительных операций зависит от числа K_T и равно:

$$N_k = N + \Delta_{j-1} + \alpha \Delta_k + \beta \Delta_d + \dots + \gamma \Delta_n$$

где

$$j > k > d > \dots > e;$$

$$\alpha < \beta < \dots < \gamma;$$

γ — число ветвей с K_T в исходной схеме;

N — рассчитывается по (1);

$\Delta_j, \Delta_k, \Delta_d, \dots, \Delta_e$ — рассчитываются по (2).

При втором способе формирования матриц комплексных проводимостей (рис. 1) число узлов исходной системы увеличивается из-за появления связей между подсистемами; при этом эквивалентруется только симметричная матрица $[Y_i]$, у которой число вычислительных операций N_i рассчитывается по (1). Если $N_i > N_k$, то целесообразно эквивалентирование провести по первому способу, в противном случае — по второму.

Для иллюстрации анализа по двум способам приведен пример электрической системы с числом узлов 15 (рис. 2,а). При разбиении схемы на две подсистемы число узлов первой подсистемы увеличивается до 16, а вторая состоит из 9 узлов (рис. 2,б). В табл. 1 приведены сравнительные оценки для трех случаев: эквивалентирование без учета K_T ; с учетом группы соединения двух трансформаторов, отличаю-

щихся от 12 (ветви 2—8, 3—9), по первому способу и то же по второму способу.

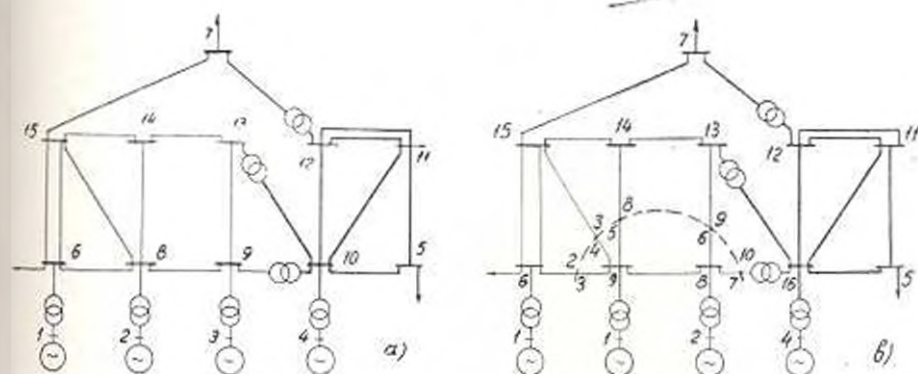


Рис. 2.

Из табл. 1 видно, что, несмотря на увеличение числа узлов системы, при разбиении ее на части второй способ для этой задачи является экономным с точки зрения выполняемых вычислительных операций. При дальнейшем увеличении числа K_T для этой задачи второй способ эквивалентирования остается экономичным.

Таблица 1

		Число ветвей с K_T	Число выполняемых вычислительных операций
15	7	0	2034
15	7	2	3548
16	10	2	2204

Таблица 2

Число выполняемых вычислительных операций		Время затраты на „Минск—32“, сек	
I способ	II способ	I способ	II способ
103706	18246	5	1

Программа для формирования $[Y]$ и $[Y_1]$, реализующая оба способа, составлена на алгоритмическом языке „Фортран—4“ для ЭВМ „Минск—32“. Время решения—менее одной секунды. Для выявления сравнительной оценки по затратам машинного времени в качестве примера приведена тестовая задача [3], где $n=46$, $m=28$, $s=18$. При учете трех ветвей с K_T по двум способам (табл. 2) затрачено соответственно 1 и 5 сек.

АрмИИИЭ

Поступило 16.VI.1975.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абонц Г. Т., Юзбашян А. М., Гапакян А. С. К исследованию трех способов обращения матрицы комплексных проводимостей электрических схем. «Изв. АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXVI, № 6, 1973.
2. Фидеев Д. К., Фидеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. Физматгиз, 1960.
3. Абонц Г. Т., Гамбуриан К. А., Мурадян С. Г. Об одной тестовой задаче расчета установившегося режима энергосистемы. «Электрические станции», 1971, № 12.

Алгоритм оптимальной перенумерации узлов схемы при ее эквивалентировании. Адося Г. Т., Габриелян Р. М. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXIX, № 3, 1976, 3—8.

Изложен алгоритм перенумерации узлов открытой схемы для ее замены схемой эквивалентного многополюсника, который основан на принципе использования минимума ячеек оперативной памяти ЦВМ. Для доказательства оптимальности перенумерации приведены примеры расчета для цепей и той же схемы при оптимальной, неоптимальной и случайной нумерации узлов.

Илл. 1. Табл. 4. Библ. 3 назв.

Определение структуры эквивалентного многополюсника и пересчет матрицы узловых проводимостей при изменении в исходной схеме. Арутюнян А. А. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXIX, №3, 1976, 9—14.

Предложена методика определения структуры эквивалентного многополюсника, которая рекомендуется при преобразовании схемы замещения электрических систем, содержащих 500—1000 узлов. Составлена программа на алгоритмическом языке «Фортра-4», обеспечивающая оптимальное решение задачи распределения памяти ЦВМ. Предложен также алгоритм пересчета исходной эквивалентной матрицы узловых проводимостей многополюсника, учитывая изменения в исходной схеме, без повторного эквивалентирования.

Илл. 3. Библ. 7 назв.

Вибрационный контроль шпиндельного узла станка. Хачумян А. В. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXIX, № 3, 1976, 15—22.

Определение вибросостояния шпиндельного узла производится на основании анализа пространственного спектра виброскорости. Показана зависимость резонансных свойств системы от дефектов исследуемого узла. Приведен пример возникновения резонанса вследствие дефекта. Сравнения в вибросостоянии шпиндельного узла позволяют организовать его производственный виброконтроль на специальной установке.

Илл. 1. Табл. 2. Библ. 4 назв.

Оптимальные условия деформации стружки при обработке на автоматических линиях. Батдасарян Г. Б., Геворкян А. О. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXIX, № 3, 1976, 23—31.

Приводятся результаты экспериментальной проверки степени влияния основных факторов на формирование стружки и предлагается методика определения оптимальной формы стружки с помощью факторного анализа. Предлагаются также рекомендации, обеспечивающие получение оптимальной формы стружки при точении конструктивных стальных резцов, оснащенных трех-, четырех-, пяти- и шестигранными твердосплавными неперетачиваемыми пластинными конструкциями ВНИИ.

Илл. 6. Табл. 3. Библ. 2 назв.

Метод построения оптимальных последовательных планов регрессионных экспериментов по свойству F-оптимальности. Манукян С. П., Манукян Э. П., Писаренко В. П. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXIX, № 3, 1976, 32—39.

Предлагается метод построения плана экспериментов, необходимых для определения постоянных коэффициентов математического описания исследуемых явлений. Эксперименты, проводимые по построенному плану, позволяют при минимальном количестве измерений получить оценки искомым коэффициентом с минимальным значением коридора ошибок. Предлагаемый метод планирования отличается от классических методов Е-оптимального планирования тем, что проводится без выполнения трудоемких вычислительных процедур.

Табл. 1. Библ. 3 назв.

УДК 62—50 : 519.2

Задачи управления для систем конечных автоматов. Сараян Н. Е., Авакян М. Н. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXIX, № 3, 1976, 40—45.

Рассматриваются простейшие способы организации взаимодействия работы несложных подсистем, приводящие к целесообразному поведению достаточного сложного типа. Используются, в частности, методы коллективного поведения конечных автоматов для воспроизведения простейших моделей двухуровневого взаимодействия.

Илл. 1. Библ. 1 назв.

УДК 621.3.095.2 : 539.215

О влиянии электрического сыпучего материала на электрическом поле коронного разряда. Торуян А. А., Цатурян А. П. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXIX, № 3, 1976, 46—54.

Анализируется влияние электрических зарядов на движение сыпучего материала. Выявлено, что между частицами действуют отталкивающие силы, приводящие к возникновению электростатического давления на стенку. Этим давлением обусловлено замедление истечения сыпучего материала. Приводятся результаты экспериментальных исследований по выявлению количественной стороны процесса замедления в цилиндре, когда в нем горит коронный разряд. Экспериментальные результаты сопоставляются с расчетами, выполненными в рамках некоторых обоснованных допущений.

Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что замедление истечения сыпучего материала зависит от приложения напряжения по закону параболы.

Полученные результаты указывают на необходимость учета электрических сил при исследовании движения сыпучего материала, а также возможность использования этих сил для регулирования истечения через ограниченное сечение закрытых трубопроводов.

Илл. 3. Табл. 1. Библ. 5 назв.

УДК 66—912—66.096.5

Неоднородное поршневое псевдооживление твердых частиц газом. Мирзаханян Р. М., Даниелян Н. Х. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXIX, № 3, 1976, 55—57.

Представляется модель и математическое описание неоднородного поршневого псевдооживления твердых частиц газом. Приведенные уравнения дают возможность определить давление в разных сечениях вертикальной колонки и высоту псевдооживленного слоя в зависимости от расхода газа.

Илл. 1. Библ. 2 назв.

УДК 532.543+556.536+627.15

К гидравлическому расчету плавных перегибов открытых русел
Токмаджян В. О. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXIX, № 3, 1976, 56—62.

Для призматических и непризматических прямоугольных русел преобразовано дифференциальное уравнение неравномерного движения в открытых руслах при больших геометрических уклонах. Дается метод определения начальных условий и интегрирования на ЭВМ.

Для конкретного случая сопоставлены ординаты теоретического и экспериментального полученного кривых свободной поверхности, отклонение составляет 3,2%.

Илл. 4. Табл. 1. Библ. 2 назв.

УДК 627.15—556.536+532.543

Расчет устойчивой формы поперечного профиля русла реки на его повороте
Ле Нгок Тун. «Известия АН АрмССР (серия Т. II.)», т. XXIX, № 3, 1976, 63—66.

Приведена методика расчета устойчивой формы русла на повороте водотока с учетом влияния поперечных скоростей. Результаты расчетов сопоставлены с данными лабораторных опытов и получено хорошее совпадение.

Илл. 2. Табл. 1. Библ. 1 назв.

УДК 621.311+621.311.2:619.271

К учету комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов в информации для расчетов установившихся режимов электрических систем
Габриелян Р. М. «Известия АН АрмССР (серия Т. II.)», т. XXIX, № 3, 1976, 67—69.

Приведен анализ двух способов формирования [Y] матриц в расчетах оптимизационных задач и задач потокораспределения, который предсказывает какой из способов целесообразно использовать с точки зрения выполняемых вычислительных операций при эквивалентировании матриц комплексных проводимостей с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов.

Илл. 2. Табл. 2. Библ. 3 назв.

ՐՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

- Շ. Տ. Աղոնց, Թ. Մ. Գաբրիելյան. Միանալի համարժեցավորման ժամանակ նրա հանգույցների
օպտիմալ վերահամարակալման ալգորիթմ 3
- Ա. Ա. Հարությունյան. Համարժեք բաղադրանքների կառուցվածքի որոշումը և հանգույցային հա-
ղորդականությունների մատրիցայի վերահաշվարկը նախնական սխեմայի փոփոխման
դեպքում 9

ՄԵՔԵՆԱԶԻՆՈՒՅՈՒՆ

- Ա. Վ. Նեշտովյան. Հաստոցի իլային հանգույցի թրթռաստուգում 15
- Շ. Ք. Քաղզասարյան, Շ. Հ. Գեորգյան. Տաշեղի օպտիմալ դեֆորմացիայի առաջացման պայ-
մանները մետաղը ափսոսալի գծերով մշակելիս 23

ՀԱՂՎԱԴԱԿԱՆ ՄԵԽԱՆԻԿԱ

- Ա. Ն. Մանուկյան, Է. Ն. Մանուկյան, Վ. Ն. Պիսարենկո. Ռեզրեսիոն փորձերի E—օպտիմալա-
յին հատկություն ունեցող հաշորդական պլանավորման մեթոդ 32
- Շ. Ն. Սարաֆյան, Մ. Ն. Ավաղյան. Վերջավոր ափսոսանքների համակարգերի կառավարման
մի ծանր խնդիրներ 40

ԷՆԵՐԳԱՄԵԽԱՆԻԿԱ

- Շ. Ա. Խոսրովյան, Ա. Ի. Մատուրյան. Պասկաձե պարպման էլեկտրական դաշտում սորուն
մեկուսիչ նյութերի շարժման մասին 46

ԴԻՄԱԿԱՆ ԵՐԵՐ

- Թ. Մ. Միքայիլանյան, Ն. Լ. Գունիկյան. Պինդ մասնիկների միոցային կեղծ հեղուկացումը
զադրոյ 55
- Վ. Հ. Խոմմաչյան, Սահուն շրջադարձներով բաց հոսների հիդրավիկական հաշվարկի վերա-
բերյալ 58
- Լե. Նզոկ Տուփ. Գծառ ոլորանում հունի լայնական պրոֆիլի կայուն ձևի հաշվարկը 63
- Թ. Մ. Գաբրիելյան. էլեկտրահամակարգերի կայուն ռեժիմների հաշվարկի համար ինֆոր-
մացիայում տրանսֆորմատորների տրանսֆորմացիայի կոմպլեքս գործակիցների հաշ-
վառման շտրջը 67



СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика

Г. Г. Адоца, Р. М. Габриелян. Алгоритм перенумерации узлов схемы при ее эквивалентировании	3
А. Я. Арутюнян. Определение структуры эквивалентного многополюсника и пересчет матрицы узловых проводимостей при изменении в исходной схеме	9

Машиностроение

А. В. Хенумян. Вибрационный контроль шпиндельного узла станка	15
Г. Б. Бигдасарян, А. О. Геворкян. Оптимальные условия деформации стружки при обработке на автоматических латках	23

Вычислительная техника

С. Н. Манукян, Э. Н. Манукян, В. М. Писаренко. Метод построения оптимальных последовательных планов регрессионных экспериментов со свойством Е-оптимальности	32
Н. Е. Сарафян, М. Н. Авакян. Задачи управления для систем конечных автоматов	40

Электротехника

А. А. Торунян, А. Н. Натурян. О движении диэлектрического сыпучего материала в электрическом поле коронного разряда	46
---	----

Научные заметки

Р. М. Мирзаханян, Н. Х. Дачишян. Непреродное поршневое смешивание твердых частиц газом	55
В. О. Тохмашян. К гидравлическому расчету плавных перегибов открытых русел	58
Ле. Н.ж. Тун. Расчет устойчивой формы поперечного профиля русла реки на его повороте	63
Р. М. Габриелян. К учету комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов и информации для расчетов установившихся режимов электрических систем	67

