

УДК 62-50

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
АКАДЕМИИ НАУК
СССР

10

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ВЫПУСК 3



НОВОСИБИРСК

1963

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

В. К. Щербаков, А. Х. Калюжный. Методы оценки и расчета электромагнитной устойчивости генератора, работающего на сложную внешнюю цепь с потерями	3
А. Х. Калюжный. Исследование самовозбуждения генератора, работающего на линию, настроенную на полуволну	14
П. П. Чиненов. Определение экономической величины мощности аварийного резерва на электростанциях	24
С. Г. Соколов. Новый принцип конструирования высоковольтных изоляторов	34
А. П. Меренков, В. Я. Хасиев. Расчет разветвленных тепловых сетей на основе их оптимизации с использованием электронных вычислительных машин (ЭВМ)	42
Э. И. Григolloк, В. М. Токачев. К теории многослойного термостата	49
А. С. Анисимов. Оптимальное управление в следящих приводах с асинхронным двухфазным двигателем	57
О. Л. Бандман. Реализация функций коэффициента передачи RC-схем	64
Ю. Т. Боршевский, Н. А. Яковлев. О двухфазном пограничном слое	78
И. П. Дружинин, З. П. Коноваленко, Н. В. Хамьянова. Изучение связи стока соседних лет на реках азиатской части СССР с помощью электронной вычислительной машины	84
В. А. Шваб, В. А. Смоловик, А. М. Капустин, Г. Г. Гайнутдинов. Высококапорное пневматическое транспортирование тонкодисперсных материалов	94
С. А. Бабенко. Флотация ильменита из песков, содержащих гуминовые вещества	104

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Г. С. Зиновьев, А. Г. Лопатин, А. И. Трубецкой. Генератор наносекундных импульсов на полупроводниковых приборах	109
И. И. Капралов. К вопросу о возбуждении дуги отрицательными импульсами напряжения	112
В. М. Рожков, Р. В. Гострем. Импульсный вольтметр повышенной точности	115
А. Г. Сенни. Преобразование корреляционных функций процессов и полей системами с распределенными параметрами	117
А. М. Иванченко, В. Н. Коробейникова. Схема для перемножения переменных напряжений	121
П. Н. Хломенок. Быстродействующие системы автоматического регулирования со ступенчатой модификацией входного сигнала	123
Б. А. Баховец, Г. П. Лыщинский. Решение некоторых задач теории инвариантности методом дифференцирования	126
И. Л. Зимонт. Принципы получения материалов водного баланса для малых бассейнов	130
В. К. Моргунов. К методике изучения воздействия льда на гидротехнические сооружения	133
М. П. Болштянский, А. В. Линцер, Ю. В. Соколов. Экспериментальное исследование напряжений в двухслойном грунтовой основании	136
Ю. Д. Тропин, Э. К. Якубайлик. Исследование магнитных свойств нитевидных монокристаллов железа	139
Н. В. Котельников, Н. А. Корнев, П. А. Малинин, Т. Д. Ермолина. Влияние отжига на магнитные свойства и структуру никеля, получаемого химическим методом	142

ХРОНИКА

Новатор горной науки (к 75-летию со дня рождения Н. А. Чинакала)	147
Василий Кузьмич Щербаков	148
Список статей, опубликованных в журнале «Известия Сибирского отделения Академии наук СССР» в 1963 г. (серия технических наук)	150

ИЗВЕСТИЯ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР

10

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Вып. 3



ИЗДАТЕЛЬСТВО
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
АКАДЕМИИ НАУК СССР

1963

В. К. ЩЕРБАКОВ, А. Х. КАЛЮЖНЫЙ

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕНЕРАТОРА,
РАБОТАЮЩЕГО НА СЛОЖНУЮ ВНЕШНЮЮ ЦЕПЬ С ПОТЕРЯМИ

Исследование электромагнитной устойчивости генератора, работающего на внешнюю цепь со сложным операторным сопротивлением, представляет значительные трудности. Эти трудности намного возрастают при учете потерь во внешней цепи. В то же время активное сопротивление элементов внешней цепи может оказать определяющее влияние на условия возникновения электромагнитной неустойчивости, т. е. самовозбуждения генератора. Важно поэтому при исследовании самовозбуждения суметь правильно учесть потери во внешней цепи без значительных усложнений самого исследования.

В работе дан анализ электромагнитной устойчивости генератора, работающего на сложную внешнюю цепь с потерями. Оценка условий самовозбуждения проводилась вначале по характеристическому уравнению системы с использованием цифровой вычислительной машины. При этом дано обоснование и применен упрощенный метод учета потерь во внешней цепи. Идея упрощенного учета потерь использована в изложенном далее упрощенном методе расчета условий самовозбуждения генератора, работающего на сложную цепь. Показаны возможности применения этого метода для исследования самовозбуждения, для оценки его опасности в конкретной схеме, для расчета реактивностей внешней цепи, необходимых для предотвращения самовозбуждения.

Рассмотрим вначале анализ самовозбуждения генератора с помощью характеристического уравнения системы. Как известно [1, 2], такое уравнение можно получить, раскрывая следующий определитель системы:

$$\begin{vmatrix} [A(p) + pX_d(p) + r] & [B(p) + X_q(p)] \\ -[B(p) + X_d(p)] & [A(p) + pX_q(p) + r] \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где $A(p)$ и $B(p)$ — операторные выражения, характеризующие внешнюю цепь, приведенную к осям d, q ;

$X_d(p)$ и $X_q(p)$ — операторные сопротивления синхронного генератора по осям d, q ;

r — активное сопротивление статорной цепи генератора, а также любое активное сопротивление, включенное последовательно между генератором и внешней цепью.

Вводя в (1) подстановку $p = j\omega$, можно исследовать устойчивость системы частотными методами. Так, в частности, целесообразно воспользоваться методом D -разбиения и с его помощью строить зоны самовозбуждения генератора в координатах σ, ω , где σ — параметр i -того эле-

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Акад. С. Л. Соболев (гл. редактор), чл.-корр. Т. Ф. Горбачев (зам. гл. редактора)

Д-р техн. наук Н. А. Желтухин, чл.-корр. К. Б. Карандеев (отв. редактор серии), д-р физ.-мат. наук Л. В. Киренский, д-р техн. наук К. Н. Коржавин, канд. техн. наук М. М. Савкин, д-р техн. наук В. К. Щербаков.

Адрес редакции: г. Новосибирск, ул. Советская, 20, комн. 401

мента внешней цепи. После подстановки $p=jv$ и ряда преобразований выражение (1) можно удобно представить в виде квадратного уравнения относительно r :

$$K(jv)r^2 + M(jv) \cdot r + N(jv) = 0, \quad (2)$$

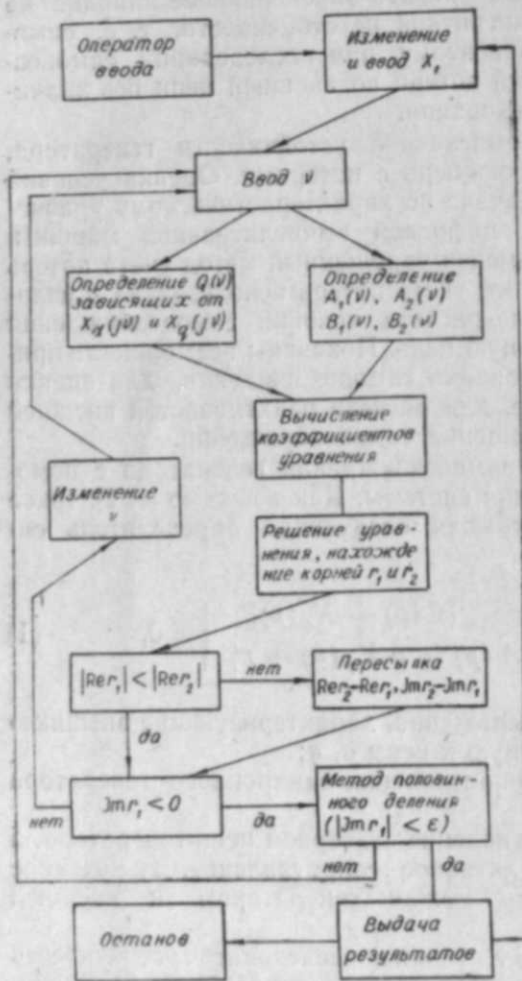
коэффициенты $M(jv)$ и $N(jv)$ которого включают $A(jv)$ и $B(jv)$. При учете потерь во внешней цепи $A(jv)$ и $B(jv)$ имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} A(jv) &= A_1(v) + jA_2(v) \\ B(jv) &= B_1(v) + jB_2(v) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Выражения (3) обычно имеют очень сложный вид, и расчет их весьма трудоемок. В качестве примера в приложении приведены выражения $A_1(v)$, $A_2(v)$, $B_1(v)$ и $B_2(v)$ для параллельного соединения индуктивности с потерями и емкости.

При отсутствии потерь во внешней цепи $A(jv) = jA_2(v)$, $B(jv) = B_1(v)$ и выражения эти значительно упрощаются. Зоны самовозбуждения для обоих указанных случаев внешней цепи при учете и неучете потерь рассчитаны на цифровой вычислительной машине. Логическая схема программы, составленной для случая внешней цепи с потерями, приведена на рис. 1. По этой программе для каждого из выбранных значений x_{ik} строятся кривые D -разбиения в плоскости $\text{Re}r$, $\text{Im}r$ и с помощью метода половинного деления находится точка пересечения кривых с осью вещественных, отсекающая наибольшее значение $r > 0$. Такое пересечение имеет место при $0 < v < 1,0$. Полученное значение $r = r_k$ и соответствующее ему значение x_{ik} — координаты k -той точки граничной кривой асинхронно-синхронной (II) или асинхронной (III) зон самовозбуждения. При отсутствии потерь во внешней цепи логическая схема программы аналогична предыдущей, лишь выбор необходимого корня из двух производится по знаку вещественной части, а не по модулю. В этом случае вещественная часть искомого корня всегда положительна, а у отбрасываемого корня она отрицательна. Составленные программы универсальны и пригодны для расчета зон самовозбуждения II и III в случае различных внешних цепей.

Рис. 1. Логическая блок-схема для расчета зон самовозбуждения генератора, работающего на сложную внешнюю цепь с потерями.



Зона синхронного самовозбуждения (зона I), внутри которой неустойчивость носит аperiodический характер, определяется, как известно, при $v=0$.

В этом случае выражения (3) приобретают определенный физический смысл:

$$A(j0) = r_{вх}, \quad B(j0) = x_{вх}.$$

Уравнение (2) вырождается при учете потерь во внешней цепи и приобретает вид:

$$r^2 + 2r_{вх}r + [x_d x_q + (x_d + x_q)x_{вх} + z_{вх}^2] = 0, \quad (4)$$

откуда

$$r = -r_{вх} \pm \sqrt{-(x_{вх} + x_d)(x_{вх} + x_q)}. \quad (4a)$$

При неучете потерь во внешней цепи $r_{вх}=0$ и уравнение (2) становится еще более простым:

$$r^2 + [x_d x_q + (x_d + x_q)x_{вх} + x_{вх}^2] = 0, \quad (5)$$

откуда

$$r = \pm \sqrt{-(x_{вх} + x_d)(x_{вх} + x_q)}. \quad (5a)$$

Зоны синхронного самовозбуждения обычно без труда могут быть рассчитаны вручную.

Для указанной выше схемы и длинной линии, короткозамкнутой на конце, при учете и неучете потерь на рис. 2 и 3 построены зоны самовозбуждения генератора. Исходные данные приведены в приложении.

Переходя к рассмотрению упрощенного учета потерь во внешней цепи, остановимся вначале на выражениях (4), (4a), (5), (5a), которые описывают границу зоны синхронного самовозбуждения. Как видно из (4a) и (5a), зона синхронного самовозбуждения в координатах $(r, x_c) = (\frac{x_{вх}}{1-v}, x_{вх})$ при учете потерь повторяет в точности зону при неучете потерь, но смещена влево по оси абсцисс на величину $r_{вх}$. Отметим, что величина $r_{вх}$ зависит от различных параметров внешней цепи.

При построении зон самовозбуждения в координатах r, x_i следует учитывать, что зависимость между $x_{вх}$ и x_i меняется в зависимости от величины потерь во внешней цепи. Иначе говоря, одним и тем же величинам $x_{вх}$ в зависимости от наличия потерь соответствуют различные значения x_i . Так, при учете потерь во внешней цепи $x_{вх} = F(x_i)$, а при неучете потерь $x_{вх0} = F(x_{i0})$. Приравняв правые части этих выражений, можно найти зависимость между x_i и x_{i0} , соответствующими одному и тому же значению $x_{вх}$, а именно $x_i = F(x_{i0})$. Используя последнюю зависимость, можно с помощью зоны синхронного самовозбуждения, не учитывая потерь во внешней цепи, построить зону I, в точности учитывая потерю. Для этого следует перестроить зону I, не учитывая потерю, т. е. для каждой точки ее границы (r_k, x_{i0k}) найти новое положение (r_k, x_{ik}) . Затем необходимо построить кривую $r_{вх} = F(x_i)$ и сместить граничную кривую зоны I на величину $r_{вх}$ влево. Часть плоскости (r, x_i) , ограниченная осью ординат и смещенной влево кривой, и является зоной синхронного самовозбуждения при учете потерь во внешней цепи. Упрощенный учет потерь в зонах асинхронно-синхронного и асинхронного самовозбуждения производится аналогично изложенному выше.

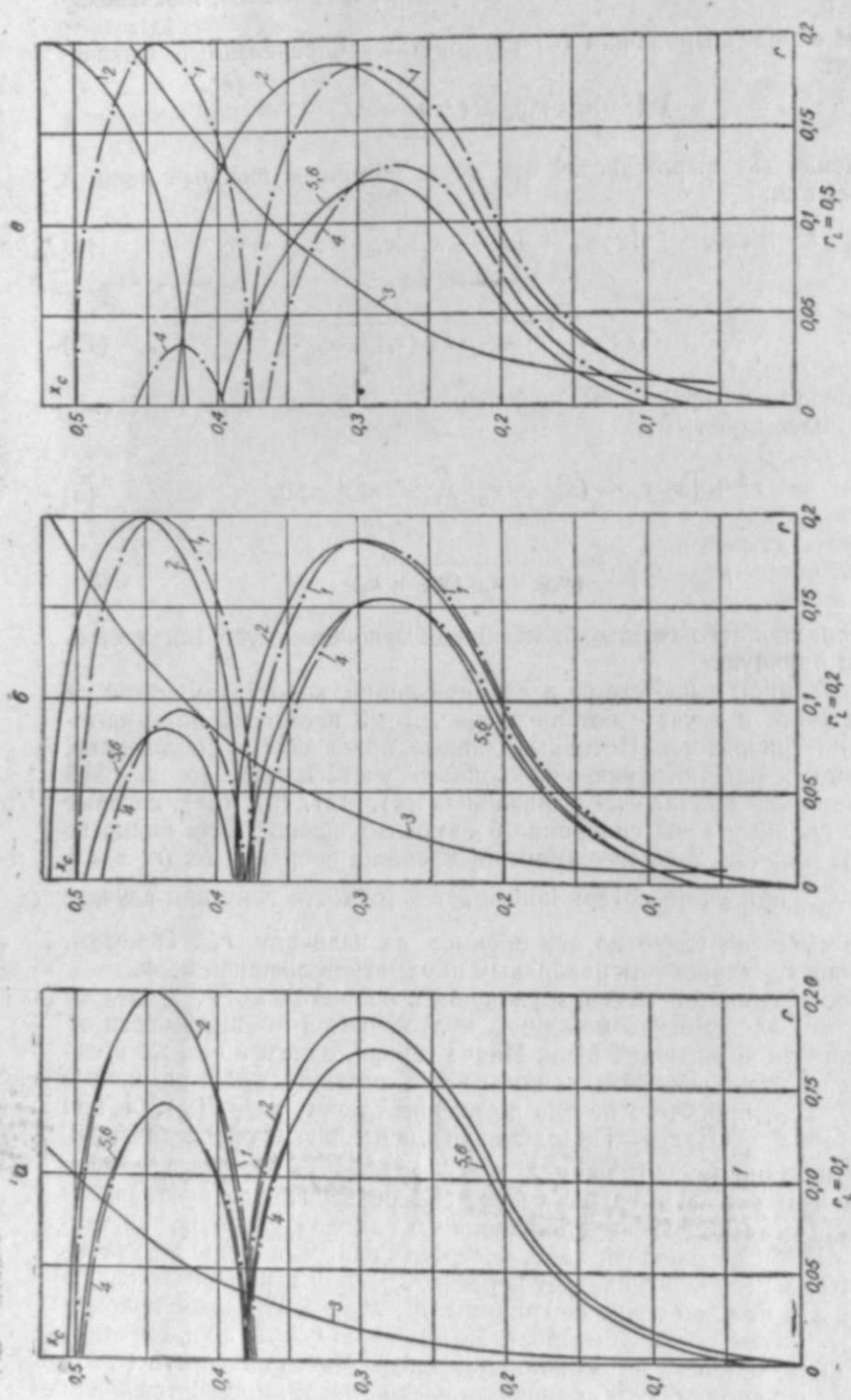


Рис. 2. Зоны самовозбуждения генератора, работающего на параллельно соединенные индуктивность с потерями ($\alpha - r_L = 0, 1$;

1 — зоны самовозбуждения, построенные точным и упрощенным методами при $r_L = 0$; 2 — промежуточные зоны самовозбуждения для упрощенного учета потерь; 3 — кривая $r_{вх}(x_c, \nu)$; 4 — учет потерь смещением кривой (1) влево на $r_{вх}(x_c, \nu)$; 5, 6 — зоны самовозбуждения генератора при учете потерь, построенные точным методом, точным методом при упрощенном учете потерь, а также упрощенным методом.

Аналитически строго доказать это как для зоны I не представляется возможным. Однако, анализируя кривые D-разбиения по r , нетрудно увидеть, что при учете потерь они, не меняя своей формы, сдвигаются влево на величину $r_{вх}(\nu)$. Применительно к зонам II и III необходимо дополнительно учесть изменение частоты свободных колебаний ν и влияние ее на величины $r_{вх}$ и $x_{вх}$. Особо следует отметить тот факт, что в зонах II и III зависимость $\nu = F(x_{вх})$ практически однозначна как при учете, так и при неучете потерь во внешней цепи.

В этом случае все реактивные элементы приводятся в частоте токов свободных колебаний (1— ν). При упрощенном учете потерь в зонах II и III кривая, описывающая эти зоны при отсутствии потерь, перестраивается так, что каждая точка ее (r_k, x_{i0k}, ν_k) занимает новое положение (r_k, x_{ik}, ν_k). Затем строится кривая $r_{вх} = F(\nu, x_i)$, учитывающая новую зависимость $\nu = F(x_i)$, а не $\nu = F(x_{i0})$. Вычитая из абсцисс перестроенной граничной кривой зон II и III абсциссы кривой $r_{вх} = F(\nu, x_i)$, получаем искомые зоны, асинхронно-синхронного и асинхронного самовозбуждения, учитывающие потери во внешней цепи. Многочисленные расчеты показали, что зоны самовозбуждения, построенные при строгом и упрощенном учете потерь, полностью совпадают при различной величине потерь во внешней цепи. Иллюстрацией этого служат рис. 2 и 3, на которых зоны самовозбуждения построены обоими методами.

Анализ выражений типа $x_{вх} = F(x_i)$ и $x_{вх0} = F(x_{i0})$, полученных для различных внешних цепей, зоны самовозбуждения, построенные на рис. 2 для случаев $r_L = 0, 1; 0, 2$ и $0, 5$, а также зоны самовозбуждения при различных внешних цепях, не приведенные в работе, позволили установить, что при соотношении $r : x \leq 0, 1$ во всех элементах внешней цепи потери мало влияют на зависимость между $x_{вх}$ и x_i , а $x_i \cong x_{i0}$. В этом случае можно строить зоны самовозбуждения, учитывающие потери во внешней цепи, путем смещения на величину $r_{вх} = F(\nu, x_i)$ зон самовозбуждения, построенных без учета потерь и не перестроенных соответственно выражению $x_i = F(x_{i0})$. Такое существенное упрощение, как видно из рис. 2, не приводит к заметным погрешностям. Это допущение можно применить и при учете потерь в длинных линиях (рис. 3). Действительно,

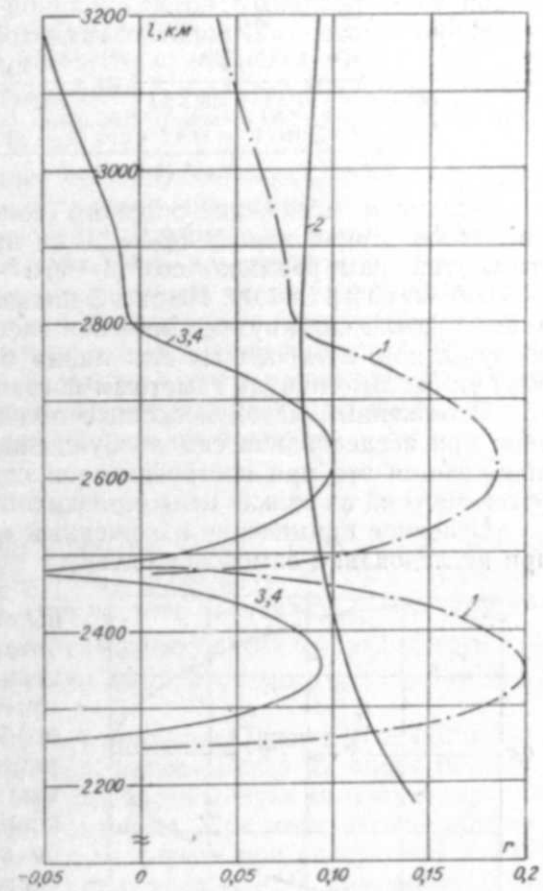


Рис. 3. Зоны самовозбуждения генератора, работающего через длинную линию с потерями на ШБМ.

1 — зоны, построенные без учета потерь, 2 — кривая $r_{вх}(l, \nu)$. 3, 4 — зоны самовозбуждения при точном и упрощенном учете потерь.

$x_{вх}$ при учете реальных потерь в линии практически не меняется. Так, для линии с потерями, короткозамкнутой на конце, имеем

$$x_{вх} = \frac{\sin 2(1-\nu)\alpha l}{\cos 2(1-\nu)\alpha l + \operatorname{ch} 2\beta l} \approx \frac{2\sin(1-\nu)\alpha l \cdot \cos(1-\nu)\alpha l}{\cos^2(1-\nu)\alpha l - \sin^2(1-\nu)\alpha l + 1} = \frac{2\sin(1-\nu)\alpha l \cdot \cos(1-\nu)\alpha l}{2\cos^2(1-\nu)\alpha l} = \operatorname{tg}(1-\nu)\alpha l.$$

Получили выражение входного сопротивления линии без потерь. Введенное допущение $\operatorname{ch} 2\beta l = 1,0$ не приводит к заметным погрешностям, так как реально $\cos^2(1-\nu)\alpha l - \sin^2(1-\nu)\alpha l \neq -1,0$, а при $l = 3000 \text{ км}$ $\operatorname{ch} 2\beta l \approx 1,01$. На рис. 3 показано, что упрощенный учет потерь для длинных линий путем смещения влево на величину $r_{вх}(\nu, l)$ зон самовозбуждения, построенных для линии без потерь, практически не приводит к сколько-нибудь заметным погрешностям.

Изложенный метод несколько облегчает учет потерь во внешней цепи при исследовании самовозбуждения точными методами. Особенно проявляется это при построении зон самовозбуждения генератора, работающего на внешнюю цепь с различными потерями (см. рис. 2).

Основное применение изложенный метод учета потерь может найти при исследовании самовозбуждения с помощью упрощенного метода [3].

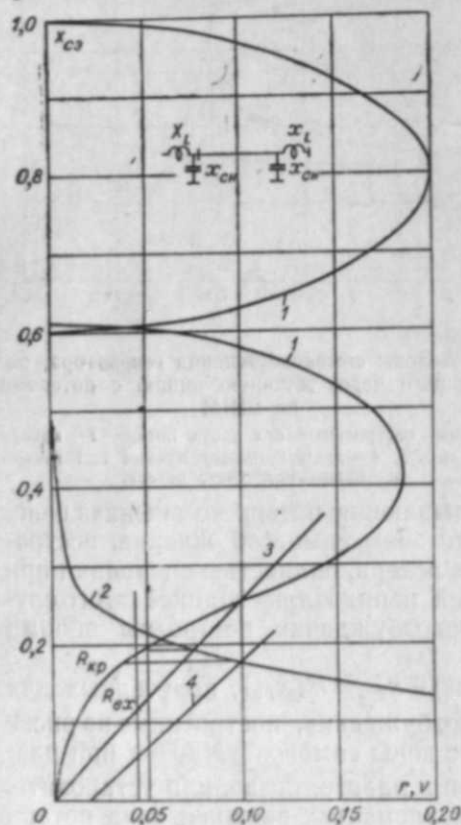


Рис. 4. Исследование самовозбуждения генератора, работающего через настроенную линию на ШБМ, по базовым зонам: 1 — базовые зоны самовозбуждения, 2 — базовая кривая $\nu = F(x_{св})$, 3 — частотная характеристика внешней цепи $x_{вхс} = F(\nu)$, 4 — она же, перестроенная с помощью x_L .

По этому упрощенному методу зоны самовозбуждения генератора, работающего на сложную внешнюю цепь, строятся в координатах r, x_i путем сочетания базовых зон самовозбуждения и частотной характеристики внешней цепи. Базовые зоны самовозбуждения строятся в координатах $r, x_{св}$ точным методом по характеристическому уравнению системы (рис. 4). Исходной схемой для их расчета во многих случаях может служить простейшая схема: генератор, работающий на сосредоточенную емкость без потерь. В качестве частотных характеристик используются зависимости типа $x_{вх} = F(\nu, x_i)$ и $r_{вх} = F(\nu, x_i)$. Так как для базовых зон справедливо выражение

$$x_{вх} = \frac{x_{св}}{1-\nu}, \quad (6)$$

то в общем случае учета потерь, приравняв правые части $x_{вх} = F(\nu, x_i)$ и (6), можно найти зависимость

$$x_i = F(x_{св}, \nu). \quad (7)$$

С помощью этой зависимости для каждой k -той точки граничной кривой базовых зон самовозбуждения $r_k, x_{свk}, \nu_k$ можно найти соответствующую точку на граничной кривой про-

межуточных зон самовозбуждения r_k, x_{ik}, ν_k . Вычитая из абсцисс полученной граничной кривой (x_i, r) абсциссы кривой $r_{вх} = F(x_i)$, получаем искомые зоны самовозбуждения генератора, работающего на сложную внешнюю цепь с потерями. Этим методом построены зоны самовозбуждения на рис. 2. Они полностью совпали с аналогичными зонами, построенными с помощью точного метода.

Построение таких зон позволяет выяснить влияние i -того параметра внешней цепи на условия самовозбуждения генератора.

При оценке условий возникновения самовозбуждения генератора, работающего на конкретную внешнюю цепь, нет необходимости строить зоны самовозбуждения. Достаточно определить частоту свободных колебаний ν системы при самовозбуждении, входное сопротивление внешней цепи $x_{вх}$ и, наконец, соответствующую ему величину критического активного сопротивления $r_{кр}$. Для такой оценки электромагнитной устойчивости системы необходимо построить частотную характеристику $x_{вх} = F(\nu)$. Приводя эту кривую к синхронной частоте по формуле

$$x_{вхс} = x_{вх}(1-\nu),$$

ее можно совместить с базовыми кривыми. Точка пересечения кривой $x_{вхс} = F(\nu)$ и базовой кривой $\nu = F(x_{св})$ фиксирует частоту свободных колебаний ν и соответствующее этой частоте значение $x_{вхс}$. По величине $x_{вхс} = x_{св}$ с помощью базовых зон самовозбуждения определяется критическое сопротивление $r_{кр}$. Если для данной схемы $r_{вх} > r_{кр}$, то самовозбуждение отсутствует.

В качестве иллюстрации на рис. 4 приведена оценка условий возникновения самовозбуждения генератора, работающего на шины бесконечной мощности через линию в 2000 км, настроенную на полуволну с помощью концевых настраивающих устройств. При этом учтены потери в линии. У настроенной передачи в этом случае при синхронной частоте $\nu_s = 1,0$ $x_{вх} = 0$. При снижении частоты тока $x_{вх} < 0$. Самовозбуждение может начаться (см. рис. 4) при частоте свободных колебаний тока $\nu = 0,075$ и при частоте самого тока $1-\nu = 0,925$. При этом $x_{вхс}$ равно $x_{вхс} = -0,193$. Учитывая, что $x_{вхс} = x_{св}$, находим по базовым зонам $r_{кр} = 0,050$. Для данной электропередачи вычислено значение активной составляющей входного сопротивления $r_{вх}$ и нанесено на рис. 4. Как видно из рисунка, $r_{вх} < r_{кр}$ и должно иметь место самовозбуждение. Необходимо, очевидно, перестроить настроенную линию таким образом, чтобы предотвратить самовозбуждение.

Как видно из сказанного, может возникнуть необходимость воздействовать на какой-то реактивный параметр внешней цепи x_i с тем, чтобы предотвратить возможность возникновения самовозбуждения. Предположим, что известно $r_{вх} = R_{вх}$ и по нему задана величина $R_{кр} < R_{вх}$. По базовым кривым находим для наперед заданного $r_{кр} = R_{кр}$ соответствующие значения $x_{вхс} = X_{вхс}$ и $\nu = N$. Подставляя в (7) $X_{вхс}$ и N , можно найти требуемое значение $x_i = X_i$. При $x_i = X_i$ частотная характеристика внешней цепи сместится вниз настолько, что ее пересечение с базовой кривой произойдет в выбранной заранее точке $R_{кр}, X_{вхс}, N$.

В случае настроенных на полуволну электропередач целесообразно производить необходимую перестройку путем подключения дополнительных батарей конденсаторов в средней части линии или добавочных индуктивностей по ее концам. Для выбранной выше настроенной передачи считается необходимым с целью обеспечения электромагнитной устойчивости получить $R_{кр} = 0,04 < R_{вх} = 0,045$. Этому значению $R_{кр}$ соответ-

ствуют $X_{вк} = 0,177$ и $N = 0,1$. Перестройка проводилась для простоты подсоединением в начале линии добавочной индуктивности, не участвующей в настройке ($x_L = \Delta X_L$). С помощью выражения (7), которое для данной схемы приведено в приложении, после подстановки в него $X_{вк}$ и N найдено необходимое значение X_L . Для обеспечения электромагнитной устойчивости следует иметь $X_L = 0,475$, т. е. дополнительно подключить $\Delta X_L = 0,042$ (4,2%).

ВЫВОДЫ

1. Исследование самовозбуждения генератора, работающего на сложную внешнюю цепь, с помощью точных методов возможно проводить, лишь применяя цифровые вычислительные машины. Анализ удобно вести по характеристическому уравнению системы с использованием частотного метода D -разбиения. При этом целесообразно воспользоваться предложенным принципом упрощенного учета потерь, заметно облегчающим расчеты, но не приводящим к ощутимым погрешностям.

2. Для различных задач оценки и исследования самовозбуждения генератора, работающего на сложную внешнюю цепь с потерями, можно воспользоваться изложенным в работе упрощенным методом расчета. Этот метод, обеспечивая необходимую точность, позволяет упрощенно, не применяя цифровых вычислительных машин, исследовать возможность самовозбуждения при работе генератора на различные внешние операторные сопротивления, оценить условия возникновения самовозбуждения в конкретной схеме, а также рассчитать мероприятия, предотвращающие самовозбуждение в ней.

Транспортно-энергетический институт
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
13/V 1963

Приложения

1. ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАТОРА

В работе был рассмотрен генератор со следующими параметрами:

$$x_d = 1,0; x_q = 0,6; x'_d = 0,25; x''_d = 0,20; x'_q = 0,21;$$

$$T_{d0} = 1700 \text{ эл. рад}; T'_{d0} = 18,75 \text{ эл. рад}; T_Q = 43 \text{ эл. рад}.$$

Операторные сопротивления генератора были представлены в виде:

$$X_d(p) = \frac{p^2 T_{d0} T'_{d0} x''_d + p T_{d0} x'_d + x_d}{p^2 T_{d0} T'_{d0} + p T_{d0} + 1};$$

$$X_q(p) = \frac{p T_Q x'_q + x_q}{p T_Q + 1}.$$

II. ВЫРАЖЕНИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ВНЕШНЮЮ ЦЕПЬ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В РАСЧЕТАХ

А. Внешняя цепь, состоящая из параллельно соединенных индуктивности и емкости, $x_L = 1,0$.

Частотные характеристики внешней цепи, согласно выражению (3). При учете потерь ($r_L = 0,1; 0,2; 0,5$)

$$A_1(v) = \frac{r_L \cdot x_c}{P(v)} \cdot ((x_c - 2v^2 x_L) [(1 - v^2)^2 x_L^2 + (1 - v^2) r_L^2 + x_c^2 - 2(1 + v^2) x_L x_c + 2v^2 [(1 - v^2) x_L + x_c] [(1 - v^2) x_L^2 + r_L^2 + x_L x_c]]);$$

$$A_2(v) = \frac{v x_c}{P(v)} \{ [(1 - v^2)^2 x_L^2 + (1 - v^2) r_L^2 + x_c^2 - 2(1 + v^2) x_L x_c] [(1 - v^2) x_L^2 + r_L^2 + x_L x_c] - 2r_L^2 [x_c - 2v^2 x_L] [(1 - v^2) x_L + x_c] \};$$

$$B_1(v) = -\frac{x_c}{P(v)} \{ [(1 - v^2) x_L^2 + r_L^2 - x_L x_c] [(1 - v^2)^2 x_L^2 + (1 - v^2) r_L^2 + x_c^2 - 2(1 + v^2) x_L x_c] + 4v^2 r_L^2 x_L [(1 - v^2) x_L + x_c] \};$$

$$B_2(v) = -\frac{2v r_L x_c}{P(v)} \{ [(1 - v^2)^2 x_L^2 + (1 - v^2) r_L^2 + x_c^2 - 2(1 + v^2) x_L x_c] x_L - [(1 - v^2) x_L^2 + r_L^2 - x_L x_c] [(1 - v^2) x_L + x_c] \},$$

где

$$P(v) = [(1 - v^2)^2 x_L^2 + (1 - v^2) r_L^2 + x_c^2 - 2(1 + v^2) x_L x_c]^2 + 4v^2 r_L^2 [(1 - v^2) x_L + x_c]^2.$$

При $v=0$

$$A_1(0) = \frac{r_L x_c^2}{x_L^2 + r_L^2 + x_c^2 - 2x_L x_c} = r_{вк}; \quad A_2(0) = 0;$$

$$B_1(0) = -\frac{x_c (x_L^2 + r_L^2 - x_L x_c)}{x_L^2 + r_L^2 + x_c^2 - 2x_L x_c} = x_{вк}; \quad B_2(0) = 0.$$

При неучете потерь, согласно (3):

$$A_1(v) = 0; \quad A_2(v) = v x_L x_c \frac{(1 - v^2) x_L + x_c}{(1 - v^2)^2 x_L^2 - 2(1 + v^2) x_L x_c + x_c^2};$$

$$B_1(v) = -x_L x_c \frac{(1 - v^2) x_L - x_c}{(1 - v^2)^2 x_L^2 - 2(1 + v^2) x_L x_c + x_c^2}; \quad B_2(v) = 0.$$

При $v=0$

$$A_2(0) = 0; \quad B_1(0) = -\frac{x_L x_{co}}{x_L - x_{co}} = x_{вк}.$$

Входные сопротивления цепи при учете переменной частоты свободных колебаний имеют вид:

$$r_L \neq 0$$

$$r_{вх} = \frac{r_L x_c^2}{[r_L(1-\nu)]^2 + [x_L(1-\nu)^2 - x_c]^2};$$

$$x_{вх} = - \frac{x_c(1-\nu)[r_L^2 + x_L^2(1-\nu)^2 - x_L x_c]}{[r_L(1-\nu)]^2 + [x_L(1-\nu)^2 - x_c]^2};$$

$$r_L = 0$$

$$r_{вх} = 0; \quad x_{вх} = \frac{-x_L x_{co}(1-\nu)}{x_L(1-\nu)^2 - x_{co}}.$$

Зависимости $x_i = F(x_{i0})$ соответствуют следующие уравнения второй степени относительно x_c :

$$\nu = 0 \quad x_L^2 x_c^2 - (x_L^2 x_{co} - r_L^2 x_{co} + r_L^2 x_L + x_L^3) x_c + x_L x_{co} (r_L^2 + x_L^2) = 0;$$

$$\nu \neq 0$$

$$(1-\nu)^2 x_L^2 x_c^2 - [(1-\nu)^2 x_L^2 x_{co} + (1-\nu)^2 x_L r_L^2 + (1-\nu)^4 x_L^3 - r_L^2 x_{co}] x_c + (1-\nu)^2 x_L x_{co} [r_L^2 + (1-\nu)^2 x_L^2] = 0.$$

Зависимость (7), необходимая для построения зон самовозбуждения упрощенным методом при учете потерь, имеет вид:

$$\nu = 0$$

$$(x_{co} + x_L) x_c^2 - [2x_{co} x_L + r_L^2 + x_L^2] x_c + x_{co} (r_L^2 + x_L^2) = 0;$$

$$\nu \neq 0$$

$$[x_{co} + x_L(1-\nu)^2] x_c^2 - [2x_{co} x_L + r_L^2 + x_L^2(1-\nu)^2] (1-\nu)^2 x_c + x_{co} (1-\nu)^2 [r_L^2 + x_L^2(1-\nu)^2] = 0.$$

Б. Настроенная на полуволновую длину линия, замкнутая на ШБМ. Линия настроена с помощью Г-образных концевых устройств (см. рис. 4). Учитываются потери в линии.

Выражение для $x_{вх}$ можно, как указывалось выше, вывести без учета потерь в линии:

$$x_{вх} = \frac{[(1-\nu)^2 x_L^2 - (1-\nu)^2 x_L x_c (x_L x_c + 2) + x_c^2] \operatorname{tg}(1-\nu) \alpha l}{(1-\nu) [(1-\nu)^2 x_L - x_L x_c^2 - x_c] \operatorname{tg}(1-\nu) \alpha l - x_c [2x_L(1-\nu)^2 - x_c]} - \frac{2x_L x_c (1-\nu) [x_L(1-\nu)^2 - x_c]}{(1-\nu) [(1-\nu)^2 x_L - x_L x_c^2 - x_c] \operatorname{tg}(1-\nu) \alpha l - x_c [2x_L(1-\nu)^2 - x_c]}$$

Определив по базовым кривым приближенно ν , можно вычислить аналитически (или получить на расчетном столе) величину $r_{вх}$. Достаточно точно $r_{вх}$ в данном случае можно определить по формуле:

$$r_{вх} \cong \frac{\operatorname{sh} 2\beta l}{\operatorname{ch} 2\beta l + \cos 2(1-\nu) \alpha l} \cdot \frac{x_{en} [x_{en} + \nu x(\nu)]}{[x_{en} - (1-\nu) \cdot x(\nu)]^2},$$

где x_{en} — настраиваемая емкость,

$x(\nu)$ — входное сопротивление части схемы до настраиваемого устройства в начале линии (см. рис. 4).

Уточняя по $R_{вх}$ величину $\nu = N$, находим для настраиваемой индуктивности в начале линии

$$X_L = \frac{X_{вх}}{1-N} + \frac{x(N) \cdot x_{en}}{(1-N)[(1-N)x(N) - x_{en}]}.$$

Эта формула соответствует выражению (7).

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Л. Левинштейн, Явление параметрического резонанса при работе синхронной машины на емкостную нагрузку. Тр. ЛПИ, 1948, № 3.
2. Э. С. Лукашов, Д. Г. Колотилова, Учет переходных процессов в полуволновой линии при исследовании самовозбуждения генератора. Тр. ТЭИ СО АН СССР, вып. XIV, 1962.
3. А. Х. Калужный, Упрощенный метод расчета зон самовозбуждения генератора при работе его на внешнюю цепь со сложным операторным сопротивлением. Тр. ТЭИ СО АН СССР, вып. XVI, 1963.

А. Х. КАЛЮЖНЫЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА,
РАБОТАЮЩЕГО НА ЛИНИЮ, НАСТРОЕННУЮ НА ПОЛУВОЛНУ

Линия, настроенная на полуволновую длину, включает в себя элементы с распределенными параметрами (участки самой линии), а также элементы с сосредоточенными параметрами (настраивающие индуктивности и емкости).

Исследование самовозбуждения генератора, работающего на настроенную линию, представляет значительные трудности вследствие сложности операторного сопротивления внешней цепи. Расчет зон самовозбуждения с помощью характеристического уравнения системы оказывается возможным лишь в случае наиболее простых схем настройки при использовании цифровой вычислительной машины.

В настоящей работе использован сравнительно простой метод оценки самовозбуждения в исследуемой электропередаче. С помощью этого метода исследовано влияние на самовозбуждение генератора различных наиболее характерных схем настройки линии на полуволну, влияние длины настраиваемой линии, количества настраивающих устройств. Рассмотрены способы борьбы с самовозбуждением в настроенных электропередачах.

ПРИНЯТЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В проведенных исследованиях рассматривался гидрогенератор с демпферными обмотками, работающий на линию, настроенную на полуволну, замкнутую на конце накоротко или через некоторое реактивное сопротивление.

В случае каждой из исследованных схем настройки выбиралась соответствующая базисная мощность из соотношения

$$P_B = \frac{U_B^2}{Z_0}$$

где Z_0 — эквивалентное волновое сопротивление настроенной линии. При однородной линии полуволновой длины $P_B = P_N$, где P_N — натуральная мощность линии. Номинальная мощность генератора в каждом случае была равна базисной $P_G = P_B$.

Оценка опасности возникновения самовозбуждения проводилась по величине критического сопротивления $r_{кр}$, которое соответствует границе зоны самовозбуждения при некотором x_c . Чем меньше величина $r_{кр}$, тем больше вероятность того, что активная составляющая входного сопротивления линии $r_{вх} > r_{кр}$ и самовозбуждения не будет.

При исследованиях за основу брался упрощенный метод, изложенный в работе [1]. По этому методу зоны самовозбуждения генератора*, работающего на любую внешнюю цепь со сложным операторным сопротивлением, строятся с помощью зон самовозбуждения генератора, работающего на емкость, и операторного сопротивления исследуемой внешней цепи. При этом считается, что частота свободных колебаний ν однозначно связана с величиной эквивалентного внешнего сопротивления x_c независимо от характера внешней цепи, т. е. зависимость $\nu = F(x_c)$ — однозначна. Для рассматриваемого генератора при работе его на емкость построены зоны самовозбуждения и зависимость $\nu = F(x_c)$, которые, как известно, считаются базовыми (рис. 1).

В случае работы генератора на линию, настроенную на полуволну, нет необходимости строить целиком зоны самовозбуждения. Входное сопротивление такой линии при синхронной частоте равно нулю ($x_{вх} = 0$), следовательно, в этом случае может возникнуть лишь асинхронное самовозбуждение при некоторой частоте свободных колебаний ν .

Исследуя самовозбуждение для каждой конкретной электропередачи, настроенной на полуволну, достаточно ограничиться определением соответствующей величины $r_{кр}$. Для этого по операторному сопротивлению настроенной линии в результате известных подстановок и преобразований составляется выражение входного сопротивления $x_{вх}(\nu)$, в котором каждый элемент схемы приведен к частоте тока самовозбуждения, равной в относительных единицах величине $1 - \nu$. С помощью этого выражения строится зависимость входного сопротивления от частоты свободных колебаний $x_{вх} = F(\nu)$. Эту кривую будем называть частотной характеристикой внешней цепи. Характеристика $x_{вх} = F(\nu)$ выходит из начала координат, а при $0 < \nu < 1,0$ величина $x_{вх} < 0$, т. е. имеет емкостной характер. Частотная характеристика приводится к синхронной частоте по формуле

$$x_{вхc} = -(1 - \nu) x_{вх} \quad (1)$$

и совмещается с базовыми кривыми на одном графике. Базовая кривая $\nu = F(x_c)$ и частотная характеристика внешней цепи $x_{вхc} = F(\nu)$, как видно из рис. 1, непременно имеют точку пересечения и при этом только одну. Учитывая, что зависимость $\nu = F(x_c)$ принята однозначной, можно

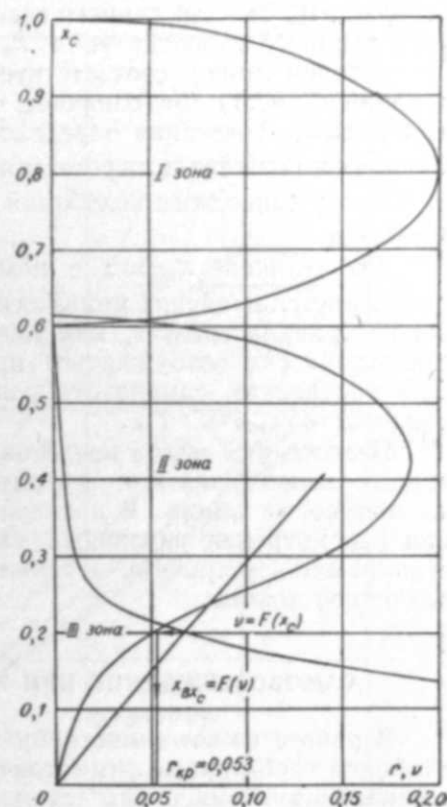


Рис. 1. Определение критического сопротивления $r_{кр}$ по базовым кривым и частотной характеристике.

* Параметры гидрогенератора, принятые в расчетах: $x_d = 1,0$; $x_q = 0,6$; $x'_d = 0,25$; $x'_q = 0,20$; $x''_q = 0,21$; $T_{d0} = 1700$ эл. рад; $T'_{d0} = 18,75$ эл. рад.

утверждать, что для данного генератора каждому значению эквивалентного входного сопротивления x_c независимо от схемы подключаемой настроенной линии, соответствует определенная частота свободных колебаний ν (рис. 1). Это означает, что самовозбуждение может возникнуть при наличии сочетания определенных значений $x_{вхс}$ и ν внешней цепи. Следовательно, точка пересечения кривых $\nu = F(x_c)$ и $x_{вхс} = F(\nu)$ фиксирует частоту свободных колебаний ν и соответствующее этой частоте значение $x_{вхс}$.

По величине $x_{вхс} = x_c$ с помощью базовых зон самовозбуждения определяется величина критического сопротивления $r_{кр}$. Полученное значение $r_{кр}$ характеризует, как уже указывалось, способность принятого генератора самовозбуждаться при работе его на исследуемую линию. Для подавления самовозбуждения необходимо, чтобы обеспечивалось неравенство $r_{вх}(\nu) > r_{кр}$.

Изложенный метод представляется наиболее простым при исследовании самовозбуждения генератора, работающего через настроенные на полуволну линии. В дальнейшем этот метод будет использоваться при рассмотрении различных схем настройки, различного числа настраивающих устройств, а также при рассмотрении настройки линий различной длины.

САМОВОЗБУЖДЕНИЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ НАСТРОЙКИ

В работе из всего многообразия схем настройки исследованы три наиболее характерные симметричные схемы: схема с поперечными настраивающими емкостями (схема № 2), схема с продольными настраивающими индуктивностями (схема № 3) и схема с концевыми Г-образными настраивающими устройствами (схема № 4). Для сравнения рассмотрена также однородная линия полуволновой длины (схема № 1). Схемы № 2 и 3 рассмотрены с тремя настраивающими устройствами каждая. С помощью выбранных схем настройки настраивалась на полуволну линия длиной в 2400 км. Схемы полуволновой и настроенных на полуволну линий приведены на рис. 2.

Если волновое сопротивление однородной линии принять за базисное, то в этом случае операторное сопротивление линии, замкнутой на сопротивление $Z(p)$, в относительных единицах имеет вид:

$$Z_a(p) = \frac{Z(p) + \text{th } \gamma l}{1 + Z(p) \cdot \text{th } \gamma l}$$

С помощью этой формулы и с учетом сделанных допущений выведены выражения для операторных сопротивлений исследуемых схем $X(p)$, а затем соответствующие выражения для входных сопротивлений $x_{вх}(\nu)$. Приводим эти выражения:

Схема № 1:

$$X(p) = \text{th } p a l;$$

$$x_{вх} = \text{tg}(1 - \nu) a l = \text{tg}(1 - \nu) \pi. \quad (2)$$

Схема № 2:

$$X(p) = \frac{x_c \text{th } 0,5 p a l [p \text{th } 0,5 p a l + x_c]}{(p^2 + 0,5 x_c^2) \text{th}^2 0,5 p a l + 2 p x_c \text{th } 0,5 p a l + 0,5 x_c^2};$$

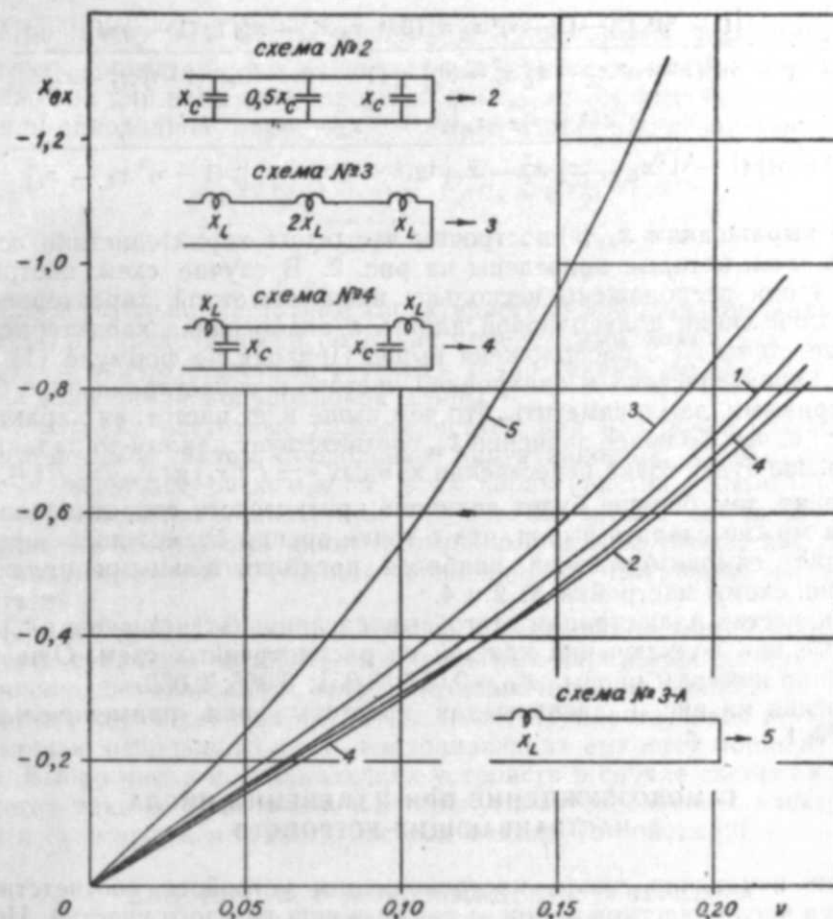


Рис. 2. Частотные характеристики полуволновой однородной линии (1) и линии длиной в 2400 км, настроенной на полуволну с помощью различных схем настройки (2—5).

$$x_{вх} = - \frac{x_c \text{tg } 0,5(1 - \nu) a l [(1 - \nu) \text{tg } 0,5(1 - \nu) a l - x_c]}{[(1 - \nu)^2 - 0,5 x_c^2] \text{tg}^2 0,5(1 - \nu) a l - 2(1 - \nu) x_c \text{tg } 0,5(1 - \nu) a l + 0,5 x_c^2}. \quad (3)$$

Схема № 3:

$$X(p) = 2 \frac{p x_L (p^2 x_L^2 + 1) \text{th}^2 0,5 p a l + (3 p^2 x_L^2 + 1) \text{th } 0,5 p a l + 2 p x_L}{(2 p^2 x_L^2 + 1) \text{th}^2 0,5 p a l + 4 p x_L \text{th } 0,5 p a l + 1};$$

$$x_{вх} = \frac{2(1 - \nu) x_L [1 - (1 - \nu)^2 x_L^2] \text{tg}^2 0,5(1 - \nu) a l}{[1 - 2(1 - \nu)^2 x_L^2] \text{tg}^2 0,5(1 - \nu) a l + 4(1 - \nu) x_L \text{tg } 0,5(1 - \nu) a l - 1} - \frac{2 [1 - 3(1 - \nu)^2 x_L^2] \text{tg}^2 0,5(1 - \nu) a l + 4(1 - \nu) x_L}{[1 - 2(1 - \nu)^2 x_L^2] \text{tg}^2 0,5(1 - \nu) a l + 4(1 - \nu) x_L \text{tg } 0,5(1 - \nu) a l - 1}. \quad (4)$$

Схема № 4:

$$X(p) = \frac{[p^2 x_L^2 + p^2 x_L x_c (2 + x_L x_c) + x_c^2] \text{th } p a l + 2 p x_L x_c (p^2 x_L + x_c)}{p (p^2 x_L + x_L x_c^2 + x_c) \text{th } p a l + x_c (2 p^2 x_L + x_c)}$$

$$x_{\text{вх}} = \frac{[(1-\nu)^2 x_L^2 - (1-\nu)^2 x_L x_c (2 + x_L x_c) + x_c^2] \operatorname{tg}(1-\nu) \alpha l}{(1-\nu) [(1-\nu)^2 x_L - x_L x_c^2 - x_c] \operatorname{tg}(1-\nu) \alpha l - x_c [2(1-\nu)^2 x_L - x_c]} - \frac{2(1-\nu) x_L x_c [(1-\nu)^2 x_L - x_c]}{(1-\nu) [(1-\nu)^2 x_L - x_L x_c^2 - x_c] \operatorname{tg}(1-\nu) \alpha l - x_c [2(1-\nu)^2 x_L - x_c]} \quad (5)$$

По выражениям $x_{\text{вх}}(\nu)$ построены частотные характеристики исследуемых схем, которые приведены на рис. 2. В случае схем настройки № 2 и 4 они расположены несколько ниже частотной характеристики однородной линии полуволновой длины, а аналогичная характеристика в случае схемы № 3 расположена выше. Приводя по формуле (1) частотные характеристики к синхронной частоте и сопоставляя их с базовыми кривыми, легко заметить, что чем выше идет частотная характеристика, т. е. чем большее значение $x_{\text{вх}}$ соответствует какому-то заданному ν , тем выше будет точка пересечения кривых $\nu = F(x_c)$ и $x_{\text{вх}} = F(\nu)$, следовательно, тем больше будет величина критического сопротивления $r_{\text{кр}}$. Отсюда можно сделать вывод, что с точки зрения возможности предотвращения самовозбуждения наиболее предпочтительными являются, очевидно, схемы настройки № 2 и 4.

В качестве иллюстрации этого вывода приводятся значения $r_{\text{кр}}$, полученные при подключении каждой из рассмотренных схем. Они соответственно номерам равны: $r_{\text{кр}} = 0,053; 0,051; 0,056; 0,050$. Построения на рис. 1 сделаны для простоты лишь применительно к схеме № 1.

САМОВОЗБУЖДЕНИЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧИСЛА НАСТРАИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

При изменении числа настраиваемых устройств соответственно меняется число участков линии, а также длина каждого участка. Исследуем, как эти факторы влияют на частотные характеристики настроенной линии. Рассмотрены схемы № 2 и 3. Для каждой из этих схем выше построены частотные характеристики в случае трех настраиваемых устройств. Исследуем дополнительно крайние случаи, когда линия настраивается на полуволну одним или бесконечным числом настраиваемых устройств.

В случае одного настраиваемого устройства можно, как известно, осуществить лишь неполную настройку на полуволну, так называемую настройку по напряжению. При настройке на полуволну с помощью одной емкости последняя может быть расположена в середине линии, так как произвести необходимую настройку одной емкостью, расположенной в начале или конце линии, не представляется возможным. При настройке линии на полуволну с помощью одной индуктивности эту индуктивность можно расположить в начале линии.

Переходя к предельному случаю бесконечного числа настраиваемых устройств, отметим, что в этом случае подразумевается равномерное распределение настраиваемых устройств по всей длине линии. Причем удельные параметры линии искусственно изменяются таким образом, чтобы линия длиной $l < 3000$ км, оставаясь однородной, имела полуволновую длину. При такой настройке поперечными емкостями меняется удельная емкостная проводимость $C'_0 = C_0 + \Delta C$ так, чтобы

$$\sqrt{(C_0 + \Delta C) L_0} \cdot l = \sqrt{C_0 L_0} 3000 = \pi. \quad (6)$$

При настройке распределенными продольными индуктивностями меняется соответственно удельная индуктивность линии $L'_0 = L_0 + \Delta L$. Выражения для входных сопротивлений $x_{\text{вх}} = F(\nu)$ получаются такие же, как для однородной линии полуволновой длины. Действительно

$$x_{\text{вх}} = \operatorname{tg}(1-\nu) \sqrt{L_0 (C_0 + \Delta C_0)} \cdot l = \operatorname{tg}(1-\nu) \sqrt{(L_0 + \Delta L) C_0} \cdot l = \operatorname{tg}(1-\nu) \pi. \quad (7)$$

Следовательно, частотные характеристики при настройке линии равномерно распределенными по длине поперечными емкостями или продольными индуктивностями остаются точно такими же, как и в случае однородной линии полуволновой длины.

Сравнивая частотные характеристики при настройке одной, тремя и бесконечным числом продольных индуктивностей, необходимо отметить значительное расхождение этих характеристик. Анализируя это расхождение, можно заключить, что с точки зрения самовозбуждения желательно настраивать линию возможно большим числом настраиваемых индуктивностей и соответственно дробить ими линию на меньшие участки.

При настройке линии с помощью поперечных емкостей можно в результате сравнения аналогичных частотных характеристик утверждать, что число настраиваемых устройств незначительно влияет на наклон частотных характеристик, при этом линию предпочтительно настраивать с помощью небольшого числа настраиваемых емкостей порядка трех — пяти. Выбор числа настраиваемых устройств в случае схемы № 2 определяется такими факторами, как пропускная способность электропередачи и суммарная мощность настраиваемых устройств [2].

ВЛИЯНИЕ НА САМОВОЗБУЖДЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА ДЛИНЫ НАСТРАИВАЕМОЙ ЛИНИИ

Выше все исследования проводились при одной длине линии $l = 2400$ км. Для получения большей общности необходимо каждую из рассмотренных схем настройки проанализировать с точки зрения условий возникновения самовозбуждения при различной длине настраиваемой линии. Для этого можно, задавшись рядом значений длины, построить при них частотные характеристики. Такой порядок, однако, представляется громоздким и требует больших расчетов. Поэтому воспользуемся другим методом. Как видно из рис. 1 и 2, самовозбуждение возникает при $\nu = 0 \dots 1$, что согласуется с теорией и экспериментом. В этом диапазоне ν частотные характеристики практически прямолинейны и о их расположении можно судить по углу наклона характеристик к оси абсцисс. Чем больше угол наклона, тем выше идет частотная характеристика и тем большее значение $r_{\text{кр}}$ ей соответствует. Для определения угла наклона частотной характеристики к оси абсцисс в начале координат необходимо от выражения $x_{\text{вх}}(\nu)$ взять частную производную по ν , а затем подставить $\nu = 0$. Величина $\left. \frac{\partial x_{\text{вх}}}{\partial \nu} \right|_{\nu=0}$ зависит в основном от длины линии, так как величины настраиваемых устройств являются функциями длины участков линии между устройствами. Таким образом, можно записать:

$$\left. \frac{\partial x_{\text{вх}}}{\partial \nu} \right|_{\nu=0} = F(l). \quad (8)$$

Для каждой схемы настройки можно вывести выражение (8), построить с его помощью, меняя l , соответствующую кривую и по ней судить о влиянии длины настраиваемой линии на угол наклона частотной характеристики или, в конечном счете, на самовозбуждение генератора.

В качестве примера приводим выражение $\left| \frac{\partial x_{вк}}{\partial \nu} \right|_{\nu=0}$ для схем № 2 и 3. При настройке тремя емкостями это выражение имеет следующий вид:

$$\left| \frac{\partial x_{вк}}{\partial \nu} \right|_{\nu=0} = -(a l + \sin a l); \quad (9)$$

при настройке тремя индуктивностями:

$$\left| \frac{\partial x_{вк}}{\partial \nu} \right|_{\nu=0} = - \left(a l + \sin a l + a l \cdot \operatorname{ctg}^2 \frac{a l}{2} + 2 \cos^2 \frac{a l}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{a l}{2} \right). \quad (10)$$

Аналогичные выражения выведены для всех вариантов рассмотренных схем. С помощью этих выражений на рис. 3 в зависимости от длины построены кривые значений $\left| \frac{\partial x_{вк}}{\partial \nu} \right|_{\nu=0}$. Для однородной линии полуволновой длины имеем, очевидно, на рисунке одну точку. Как видно из рис. 3, при настройке линии на полуволну с помощью конечного числа индуктивностей при уменьшении длины линии угол наклона частотной характеристики заметно растет и тем сильнее, чем меньше число настраиваемых индуктивностей. При настройке одной индуктивностью при $l = 1500$ км

$$\left| \frac{\partial x_{вк}}{\partial \nu} \right|_{\nu=0} = \infty.$$

При настройке линии на полуволну с помощью конечного числа поперечных емкостей (схема № 2) или с помощью концевых настраиваемых устройств (схема № 4) с уменьшением длины линии уменьшается и величина $\left| \frac{\partial x_{вк}}{\partial \nu} \right|_{\nu=0}$.

Таким образом, можно сделать вывод, что с точки зрения самовозбуждения наиболее предпочтительны схемы настройки № 2 и 4, а также, очевидно, комбинация этих двух схем. С уменьшением длины настраиваемой линии преимущества этих схем перед другими схемами увеличиваются.

В работе проводился анализ и сделаны выводы для нескольких наиболее характерных и перспективных схем настройки. Однако с помощью изложенных в статье методов можно без особого труда исследовать и любые другие схемы настройки.

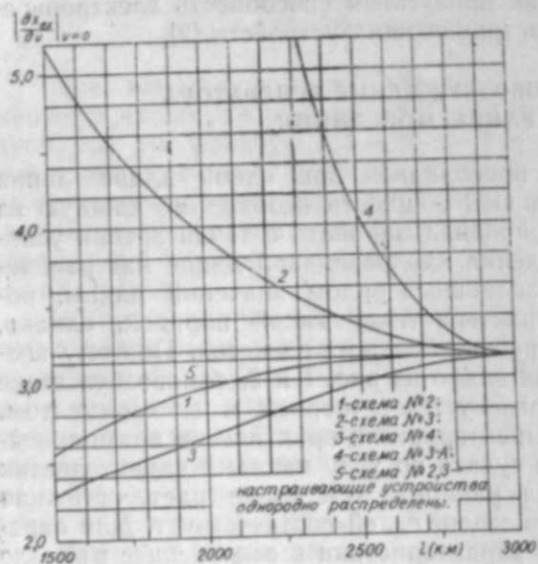


Рис. 3. Зависимости угла наклона частотных характеристик от длины настраиваемой линии при различных схемах настройки.

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАСТРАИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

Использование для настройки линии на полуволну поперечных емкостей или концевых настраиваемых устройств не может в ряде случаев предотвратить опасность самовозбуждения генератора. Поэтому необходимо рассмотреть методы борьбы с самовозбуждением при использовании рекомендованных схем настройки (№ 2 и 4).

Самовозбуждение можно, очевидно, подавить, изменяя определенным образом соответствующие параметры настраиваемых устройств,

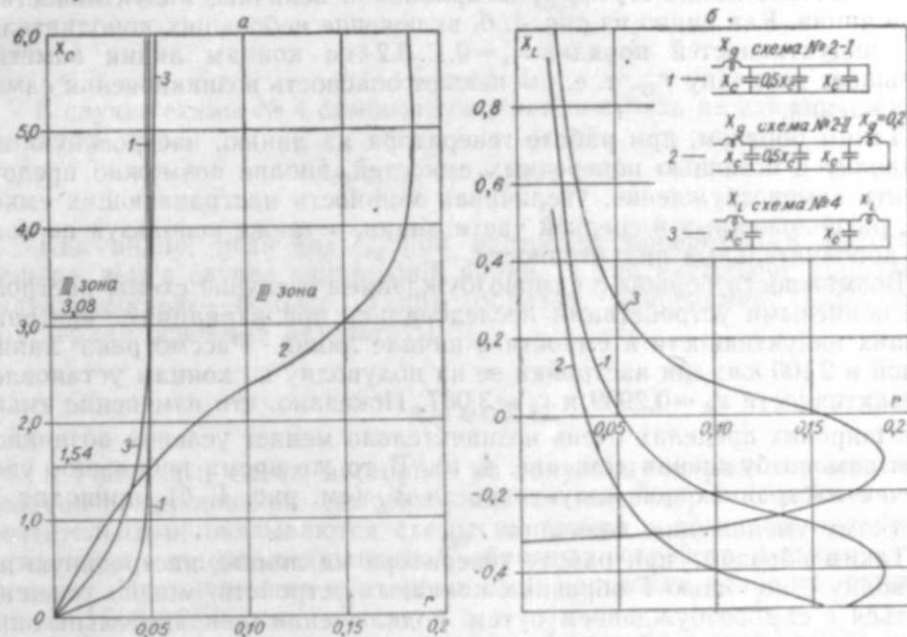


Рис. 4. Подавление самовозбуждения с помощью перестройки линии.

а) увеличение мощности настраиваемых емкостей (схема № 2: 1 — изменение емкости в начале линии; 2 — изменение емкости в середине линии, схема № 4: 3 — изменение емкости в начале линии); б) включение по концам линии дополнительных индуктивностей, не участвующих в настройке (кривая 1 соответствует вариации X_L в схеме № 2-1, кривая 2 — в схеме № 2-II, кривая 3 — в схеме № 4).

перестраивая линию. Для исследования влияния вариаций того или иного параметра следует строить зоны самовозбуждения в координатах (X_i, r) , где X_i — варьируемый параметр. Зоны самовозбуждения (X_i, r) строятся [1] с помощью базовых кривых и зависимости

$$x_{вк} = F(\nu_1, x_1, x_2, \dots, X_i, \dots, x_n).$$

При рассмотрении схемы № 2 исследовалось влияние на самовозбуждение изменения настраиваемых емкостей в начале и в середине линии. Поскольку настраиваемая емкость в конце линии по схеме не оказывает влияния на самовозбуждение, ее изменение не исследовалось. Рассмотрен случай настройки на полуволну линии длиной в 2400 км. При этом концевые емкости равны $x_c = 3,078$, а емкость в середине линии — $x_c = 1,539$.

Показано (рис. 4, а), что вариация настраиваемой емкости, расположенной в начале линии, практически не влияет на самовозбуждение генератора. В то же время, изменяя настраиваемую емкость в середине линии, можно существенно воздействовать на условия возникновения

самовозбуждения. Так, незначительно увеличивая мощность батарей конденсаторов в середине линии, можно заметно уменьшить величину $r_{кр}$ и, следовательно, предотвратить возникновение самовозбуждения. Необходимо также отметить, что при отключении части конденсаторов в середине линии возникновение самовозбуждения может стать неизбежным.

В случае схемы № 2 рассмотрено также подавление самовозбуждения с помощью дополнительно подключаемых концевых индуктивностей, не участвующих в настройке (рис. 4, б). Варьировалась индуктивность в начале линии X_d при фиксированной величине индуктивности в конце линии. Как видно из рис. 4, б, включение небольших дополнительных индуктивностей порядка $x_d = 0,1 \dots 0,2$ по концам линии заметно уменьшает величину $r_{кр}$, т. е. уменьшает опасность возникновения самовозбуждения.

Таким образом, при работе генератора на линию, настроенную на полуволну с помощью поперечных емкостей, вполне возможно предотвратить самовозбуждение, увеличивая мощность настраиваемых емкостей, расположенных в средней части линии, а также используя по концам дополнительные индуктивности.

Возможности борьбы с самовозбуждением в случае схемы настройки с концевыми устройствами исследовались при вариациях, настраиваемых индуктивности и емкости в начале линии. Рассмотрена линия длиной в 2400 км; для настройки ее на полуволну по концам установлены реактивности $x_L = 0,2939$ и $x_C = 3,087$. Показано, что изменение емкости в широких пределах очень незначительно меняет условия возникновения самовозбуждения (см. рис. 4, а). В то же время небольшое увеличение настраиваемой индуктивности X_L (см. рис. 4, б) приводит к заметному уменьшению величины $r_{кр}$.

Таким образом, при работе генератора на линию, настроенную на полуволну с помощью Г-образных концевых устройств, можно успешно бороться с самовозбуждением путем подключения дополнительных индуктивностей по концам линии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Все результаты были получены с помощью упрощенного метода расчета самовозбуждения генератора. Была сделана попытка проверить основные результаты с помощью точного метода расчета, когда зоны самовозбуждения рассчитываются по характеристическому уравнению системы. Для этого с помощью цифровой вычислительной машины построены зоны самовозбуждения при работе генератора на однородную линию, а также в случае линии, настроенной на полуволну с помощью концевых устройств. В первом случае величина $r_{кр}$ оказалась больше, чем во втором, на $\Delta r_{кр} = 0,2315\%$. Это хорошо совпадает с результатами, полученными упрощенным методом, где $\Delta r_{кр} \cong 0,3\%$.

Следовательно, упрощенный метод вполне приемлем при исследовании влияния на самовозбуждения различных сложных внешних цепей и, в частности, настроенных на полуволну электропередач.

Полученные результаты были проверены экспериментально на электродинамической модели ТЭИ СО АН СССР. Рассматривалась работа модельного турбогенератора* на однородную линию полуволновой

* Параметры модельного турбогенератора: $x_d = 1,52$; $x_d' = 0,11$; $x_d'' = x_d''' = 0,06$; $T_{d0} = 280$ эл. рад; $T_{d0}' = 3,0$ эл. рад.

длины, а также линии, настроенные на полуволну с помощью рассмотренных схем настройки. Реактивность трансформатора не участвовала в настройке. Возникновение самовозбуждения достигалось путем постепенного уменьшения добавочного активного сопротивления r_d . Момент начала самовозбуждения фиксировался, и определялась величина $r_{кр}$. При определении $r_{кр}$ учитывались потери в трансформаторе, линии и настраиваемых индуктивностях. Ниже приводятся значения $r_{кр}$, полученные для различных схем:

№ схемы	$r_{кр}(\%)^*$
1	10,7
2	6,9
3	13,5

В случае схемы № 4 самовозбуждения получить не удалось, так как оказалось, что

$$r_a + r_L + r_{тр} > r_{кр}.$$

Как видно, величина $r_{кр}$ при настройке поперечными емкостями меньше, чем в случае однородной линии, а при настройке продольной индуктивностью — больше. Таким образом, эксперимент качественно подтвердил основные результаты.

ВЫВОДЫ

1. Различные схемы настройки на полуволну по-разному влияют на условия возникновения самовозбуждения генератора. Наиболее предпочтительными оказываются схемы настройки с помощью поперечных емкостей и с помощью концевых Г-образных устройств, а также их комбинация. Преимущества указанных схем настройки наиболее ощутимы при $l = 1500 - 2000$ км.

2. Опасности возникновения самовозбуждения в этих схемах можно избежать, перестраивая линию, т. е. путем увеличения мощности батарей настраиваемых конденсаторов в средней части линии, а также в результате подключения по концам линии дополнительных индуктивностей.

Транспортно-энергетический институт
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
28/XII 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Х. Калюжный, Упрощенный метод расчета зон самовозбуждения генератора при работе его на внешнюю цепь со сложным операторным сопротивлением. Тр. ТЭИ СО АН СССР, вып. 16, 1963.
2. О. В. Ольшевский, Повышение пропускной способности дальних электропередач распределением настраиваемой емкости. Изв. СО АН СССР, 1957, № 11.

* Значения $r_{кр}$ приведены здесь к волновому сопротивлению однородной линии.

П. П. ЧИНЕНОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ МОЩНОСТИ АВАРИЙНОГО РЕЗЕРВА НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

При проектировании энергосистем и отдельных электростанций величина установленной мощности определяется на основании энергетических балансов.

Учитывая основные требования, предъявляемые к надежности энергоснабжения и качеству электроэнергии, баланс мощности можно записать так,

$$P_y > P_{\text{нм}} + P_{\text{ч}} + P_a + P_p, \quad (1)$$

$P_{\text{нм}}$ — максимальная нагрузка потребителей,

$P_{\text{ч}}, P_a, P_p$ — соответственно мощности частотного, аварийного и ремонтного резерва.

Величины P_a и $P_{\text{ч}}$ чаще всего или вычисляются вероятностными способами, или принимаются согласно нормам в процентах от совместного максимума. Величина P_p обычно берется по нормам.

В практике проектирования, как правило, полагают необходимым определять все составляющие раздельно. При этом, по существу, не принимаются во внимание такие важные факторы, как экономическая эффективность затрат и степень использования мощности.

В специальной литературе есть рекомендации определенным образом совмещать некоторые функции и слагающие резерва, а затем выбирать его по минимуму народнохозяйственных затрат. Рекомендации по использованию мощности или совсем не даются, или оказываются недостаточными, в связи с чем возникает необходимость дальнейшего совершенствования расчетов.

Ниже приводятся некоторые соображения по выбору резервной мощности с учетом ее фактического использования и экономической эффективности затрат.

РЕМОНТНЫЙ РЕЗЕРВ

Допустим, что на основании имеющихся суточных графиков обычными способами построены и наложены друг на друга годовой график по продолжительности (рис. 1, а) и годовой график месячных максимумов (рис. 1, в). Допустим далее, что для нормального электроснабжения нужен некоторый аварийный резерв в размере P_a .

Площадь провала нагрузок S , полученная на рис. 1, позволяет в течение года последовательно выводить в плановые ремонты соответствующую мощность без необходимости ее резервирования.

Если усредненную мощность одного агрегата обозначить P_c , общее количество n , а длительность ремонта единицы t_c , то потребная для

ревизии всех имеющихся агрегатов расчетная площадь провала

$$S_p = n P_c t. \quad (2)$$

Действительная площадь провала S из графика нагрузок может быть вычислена так,

$$S = [n P_c T - (t \sum P_{im} + P_a T)] K, \quad (3)$$

где T — расчетный промежуток времени (год),
 $S_n = n P_c T$ — полная площадь графика,
 P_{im} — максимум нагрузки в интервале времени t (месяц).

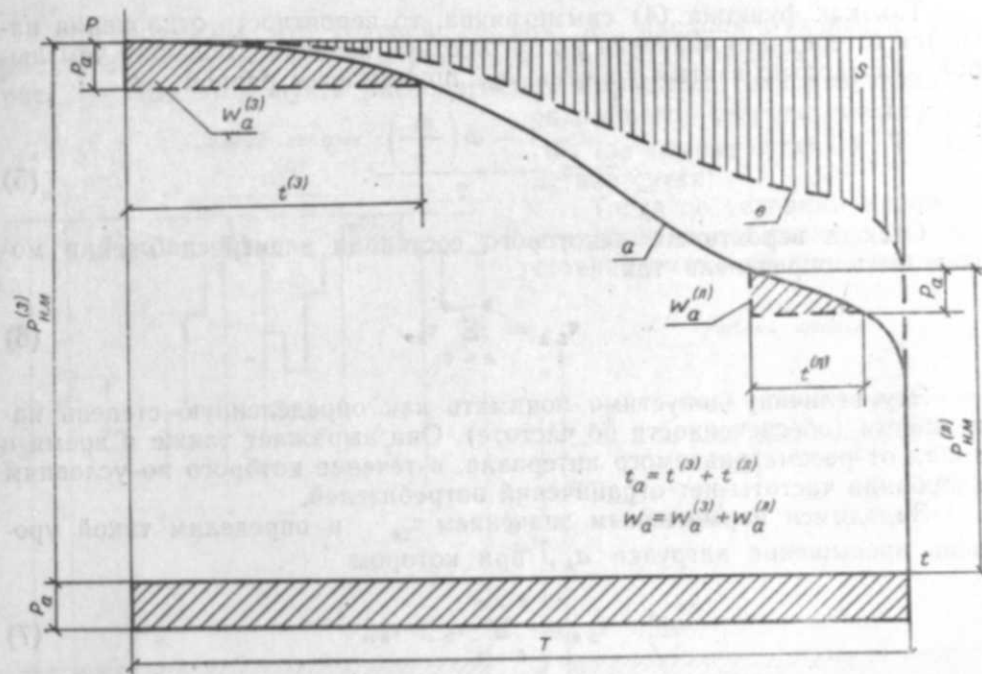


Рис. 1.

Отсюда ремонтный резерв потребуется только в том случае, когда $S < S_p$. В случае $S > S_p$, резервная мощность этого назначения не нужна.

Если ремонты требуют площади большей, чем S , то необходима некоторая ремонтная мощность P_p . Ее величину всегда можно принять из тех соображений, чтобы за пределами площади провала нагрузок оставалась лишь конденсационная мощность, ревизия которой предусматривается непрерывно до конца года. Такое допущение соответствует минимуму P_p и тому, что равновеликая мощность, практически постоянно будет находиться в ремонте. При этом резерв не может увеличивать располагаемую мощность станции и использоваться помимо своего прямого назначения.

ЧАСТОТНЫЙ РЕЗЕРВ

Электрические нагрузки в отдельные моменты времени отклоняются от заданного графика и вызывают колебания частоты. Размеры отклонений принято рассматривать, как случайные события, для которых

плотность вероятностей выражается функцией нормального распределения

$$\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{a}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (4)$$

где σ — среднее квадратичное отклонение случайной величины (X) от нуля,

$t = \frac{X}{\sigma}$ — величина, не имеющая размерности.

Так как функция (4) симметрична, то вероятность отклонения нагрузки от среднего значения по абсолютной величине, большая чем любой произвольно взятый уровень a_k , принимается равной

$$\tau_k = \frac{1 - \Phi\left(\frac{a_k}{\sigma}\right)}{2}. \quad (5)$$

Отсюда вероятность некоторого состояния электроснабжения может быть определена так,

$$\tau_{\Sigma k} = \sum_{k=0}^{k=n} \tau_k. \quad (6)$$

Эту величину допустимо понимать как определенную степень надежности (обеспеченности по частоте). Она выражает также и время в долях от рассматриваемого интервала, в течение которого по условиям колебания частоты нет ограничений потребителей.

Зададимся нормативным значением $\tau_{\Sigma k}$ и определим такой уровень превышения нагрузки a_k , при котором

$$\tau_{\Sigma k} = \sum_{k=0}^{k=m} \tau_k \geq \tau_{нч}, \quad (7)$$

где $\tau_{нч}$ — нормативная «обеспеченность по частоте».

Величину $\tau_{нч}$ подберем таким образом, чтобы были учтены все положительные, наиболее вероятные отклонения нагрузки, а относительно редкие и потому маловероятные во внимание не принимались. Это будет означать, что общая длительность наиболее вероятных отклонений, которые целесообразно обеспечить генерирующей мощностью, равна $\tau_{нч}$, а длительность отклонений, которые не целесообразно обеспечивать дополнительной мощностью,

$$\Delta \tau = \tau_{\Sigma k} - \tau_{нч}. \quad (8)$$

С учетом изложенного все отклонения нагрузки и верхний расчетный уровень, ограниченный условием (7), могут быть найдены по формуле

$$P_k = P \sum_{k=0}^{k=m} m \tau_k t_k. \quad (9)$$

Принимая во внимание одинаковую вероятность появления равных по абсолютной величине положительных и отрицательных отклонений, получаем и абсолютную величину последних.

Располагая суточными графиками и рассчитав наиболее вероятные размеры колебаний электропотребления, можно внести соответствующие коррективы в их конфигурацию и получить полную расчетную нагрузку потребителей, а также динамику ее изменений во времени с учетом влияния случайных факторов.

Важно отметить, что коррективы графиков, как будет показано ниже, необходимы только для интервалов наибольших нагрузок.

АВАРИЙНЫЙ РЕЗЕРВ

Предположим, что годовой график по продолжительности (см. рис. 1, а) построен по двум суточным графикам (зимнему и летнему, рис. 2). При этом пусть располагаемая выработка электроэнергии от аварийного резерва составляет $W_a^{(з)}$ (за зимние сутки) и $W_a^{(л)}$ (за летние сутки).

Тогда по условиям надежности электроснабжения надо постоянно иметь «на оборотах» мощ-

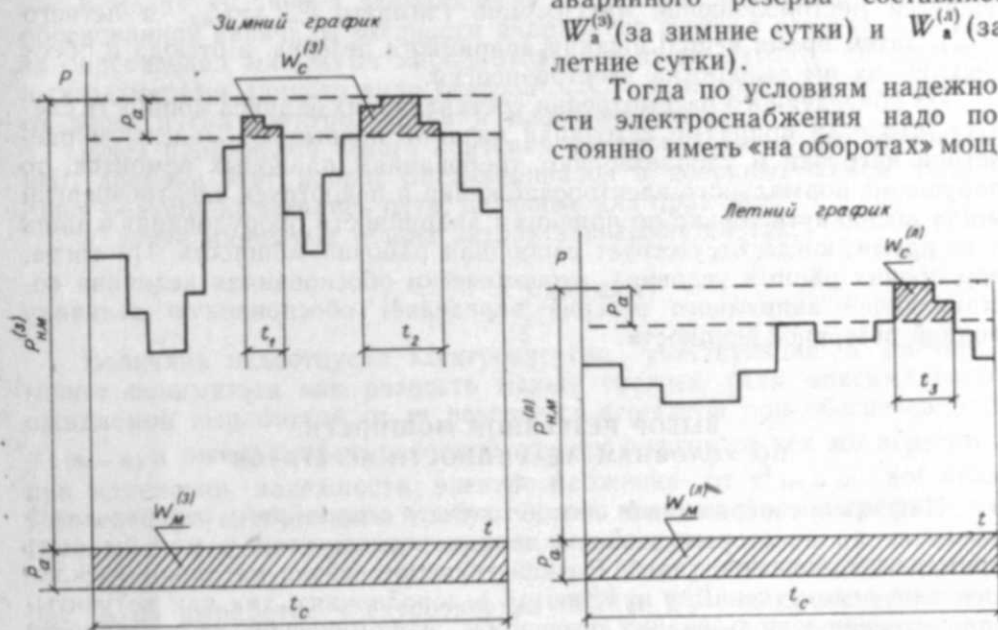


Рис. 2.

ность, которая превышает нагрузку в каждый данный момент не меньше, чем на величину P_a .

Из рис. 2 следует, что такое требование удовлетворяется за счет рабочей мощности, исключая периоды максимумов и близких к ним нагрузок.

Отсюда необходимость в аварийном резерве возникает только за время $t_1 + t_2$ в зимние сутки и t_3 — в летние сутки.

На этой основе можно определить длительность использования аварийного резерва (t_a) в течение года.

Обозначив через n_1 число дней в году, принятых для зимнего сезона, а через n_2 — для летнего сезона, получим:

$$t_a = (t_1 + t_2) + t_3 n_2 = t^{(з)} + t^{(л)}, \quad (12)$$

где $t^{(з)}$, $t^{(л)}$ — периоды использования резервной мощности зимой и летом.

За время t_a резервируемая выработка электроэнергии (в том числе зимой $W_a^{(з)}$ и летом $W_a^{(л)}$) находится по следующей формуле:

$$W_a = W_a^{(з)} + W_a^{(л)} = n_1 \sum_{k=0}^{k=t^{(з)}} P_k t_k + n_2 \sum_{k=0}^{k=t^{(л)}} P_m t_m, \quad (13)$$

где P_k — нагрузка по графику в интервале t_k и P_m — нагрузка в интервале t_m .

Формула (13) определяет площадь графика по продолжительности, построенного на основании суточных графиков для времени t_a и нагрузок, обеспеченных аварийным резервом.

Полученные результаты могут быть отражены и в годовом графике по продолжительности (см. рис. 1). Для этого на кривой графика определяется местоположение максимумов (зимнего $P_{\text{зим}}^{(з)} = P_{\text{зим}}$ и летнего $P_{\text{лет}}^{(л)}$), затем время использования аварийного резерва, а отсюда и обеспечиваемая им выработка электроэнергии.

Из приведенного рассмотрения составляющих баланса мощности следует, что если принятые источники питания покрывают максимум расчетной нагрузки и удовлетворяют требованиям плановых ремонтов, то нарушение нормального электроснабжения и недоотпуск электроэнергии могут возникнуть только по причинам аварийности оборудования и лишь в то время, когда отсутствует свободная рабочая мощность. Но тогда, при прочих равных условиях, экономически обоснованная величина составляющей аварийного резерва определяет обоснованную величину полной резервной мощности.

ВЫБОР РЕЗЕРВНОЙ МОЩНОСТИ ПО УСЛОВИЯМ АВАРИЙНОСТИ АГРЕГАТОВ

Наиболее совершенный способ расчета аварийного резерва основывается на некоторых выводах теории вероятностей и мог бы быть применен в данном случае*. Но действующие сейчас методики (исключительно ведомственные) нуждаются в дополнениях, так как не учитывают степени использования резерва и экономической эффективности затрат. Исходя из этого, сделана попытка ввести в одну из них условия и практические приемы расчета, позволяющие уточнить выбор указанной мощности.

Сущность методики [1, 2] заключается в следующем. Реальная энергетическая система, состоящая из самых разнообразных агрегатов, приводится к эквивалентному виду с условным расчетным количеством равнозначных агрегатов, имеющих одинаковую аварийность P . При таких допущениях вероятность одновременного пребывания каких-либо m агрегатов в аварийном, а остальных $n - m$ в исправном состоянии

$$\tau_n^m = C_n^m p^m (1 - p)^{n - m}, \quad (14)$$

где C_n^m — общее число возможных аварий.

* Работы: Р. А. Фермана, В. В. Болотова, А. А. Морозова и в последнее время А. Г. Кудинова, А. М. Осепяна, Н. Аврамова.

Отсюда, вероятность одновременной аварии с любым числом агрегатов от нуля до m , или общая вероятная продолжительность аварийных состояний в системе в долях от расчетного промежутка времени составит

$$\tau_{\Sigma m} = \sum_{n=0}^{n=m} \tau_n^m. \quad (15)$$

Число резервных агрегатов m принимается таким, чтобы

$$\tau_{\Sigma m} = \tau_{\Sigma (m - m)} \geq \tau_{\Sigma}^*, \quad (16)$$

где τ_{Σ}^* — требуемая или заданная «надежность по аварийности». Согласно методике, τ_{Σ}^* находится в пределах 0,99000—0,99990.

В целях получения экономически оправданной и поэтому более обоснованной величины мощности аварийного резерва следует исходить из определения минимума народнохозяйственных затрат, обусловленных размерами данного вида резерва (A_y) и величиной ущерба (A_a) от недоотпуска электроэнергии в промышленности.

Идея применения такого критерия высказана давно, но до последнего времени этот вопрос рассматривался в довольно общем виде и лишь недавно наметились пути, полезные для практики.

Условие минимума общих затрат записывается так:

$$A_y + A_a = \text{минимум}. \quad (17)$$

Величина недоотпуска электроэнергии, участвующая в расчетах, может пониматься как разность между средней (или максимальной) ожидаемой выработкой от m резервных агрегатов при обеспеченности $\tau_{\Sigma (m - m)}$ и ожидаемой выработкой электроэнергии от тех же агрегатов при изменении надежности электроснабжения от $\tau_{\Sigma (m - m)}$ до нуля. Приведенные соображения требуют учета влияния формы графика нагрузок, что можно сделать следующим образом.

Допустим, что в годовом графике по продолжительности (см. рис. 1, а) выработка электроэнергии $W_a^{(з)}$ и $W_a^{(л)}$ обеспечивается аварийным резервом из m агрегатов, которые получены на основании приведенной выше методики [1, 2]. Теперь в пределах обоих участков, в более крупном масштабе (рис. 3), определим величину выработки электроэнергии от рабочей мощности, резервируемую каждым агрегатом в отдельности (допустим $m=5$, тогда это будут площадки 1÷5).

Для большей точности расчетов лучше пользоваться равновеликими графиками c , в которых резервные агрегаты за время своей работы несут полную нагрузку (такие графики могут быть названы приведенными).

Учитывая форму графиков и полагая, что вероятность появления выработки электроэнергии от m резервных машин равна вероятности выхода в аварию m машин из состава рабочей мощности, можно найти ожидаемую выработку от резервных агрегатов при разных уровнях надежности электроснабжения. Эта выработка определяется на основании того, что математическое ожидание, или среднее значение случай-

* Выбранный резерв обеспечивает надежность электроснабжения по условиям аварийности оборудования электростанций. Поэтому влияние связей не учитывается. Этот вопрос решается особо при размещении резервной мощности в системе.

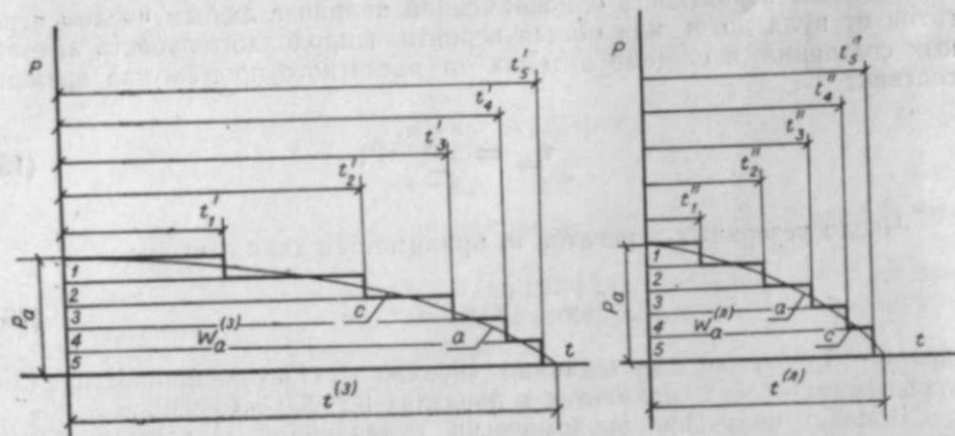


Рис. 3.

ной величины, равно сумме произведений всех ее возможных значений (W_m), умноженных на вероятности их появления (τ_m).

Отсюда

$$W_{am} = \sum_{m=0}^{m-m} W_m \tau_m = \sum_{m=0}^{m-m} (P_m \tau_m t_m) \tau_m = P \sum_{m=0}^{m-m} m \tau_m^2 t_m, \quad (18)$$

где P — мощность одного агрегата,
 t_m — время, в течение которого работает m -ное количество агрегатов.

Наибольшая ожидаемая выработка электроэнергии при обеспеченности $\tau_{\Sigma m} = \tau_3$ составит

$$W_{an} = W_{a(m-m)} = \sum_{m=m} W_m \tau_m. \quad (19)$$

Тогда при изменении $\tau_{\Sigma m}$ от нуля до τ_3 средний недоотпуск электроэнергии

$$\Delta W_{an} = W_{an} - W_{am}. \quad (20)$$

Недоотпуск электроэнергии наносит определенный ущерб

$$A_{ym} = \Delta W_{am} q, \quad (21)$$

где q — средневзвешенная величина ущерба от недоотпуска 1 квт·ч электроэнергии [2].

Годовые затраты, связанные с мощностью аварийного резерва, можно найти по следующей формуле:

$$A_{am} = \frac{P}{T_n} (mK_m + C_{pm}) + C_p, \quad (22)$$

где K_m — капиталозатраты, обусловленные пуском каждого из m резервных агрегатов,

C_{pm}, C_p — соответственно переменная и постоянная составляющие эксплуатационных расходов,

T_n — нормативный срок окупаемости, принятый в энергетике.

Полные расчетные затраты, обусловленные мощностью аварийного резерва и недоотпуском электроэнергии при различной надежности электроснабжения, составят

$$A_{\Sigma m} = A_{ym} + A_{am}. \quad (23)$$

Отсюда экономически обоснованная величина аварийного резерва ($P_{a\text{cp}}^{(a)}$) с учетом среднего недоотпуска электроэнергии определяется условием

$$A_{\Sigma m} = \text{минимуму} \quad (24)$$

и находится так:

$$P_{a\text{cp}}^{(a)} = P m_1^{(a)}. \quad (25)$$

где $m_1^{(a)}$ — число агрегатов, соответствующее минимуму полных затрат (24).

При определении $P_{a\text{cp}}^{(a)}$, как это следует из расчета, не оценивается эффект ущерба в промышленности от недоотпуска электроэнергии, когда последний достигает максимальных значений. Такой фактор вообще следует считать важным, а в ряде отраслей и решающим. Поэтому для более всесторонней оценки экономического эффекта необходимо рассмотреть и этот вопрос.

Максимальная ожидаемая выработка электроэнергии при различной обеспеченности, согласно известному из математической статистики правилу «трех сигм», может быть определена по формуле

$$W_{am} = W_{am} + 3\sigma. \quad (26)$$

Среднее квадратичное отклонение случайной величины σ_m (в формуле 26) должно быть взято для значения $m = m_1$, поскольку наибольшая величина W_{am} будет тогда, когда все m_1 резервных агрегатов замещают m_1 рабочих агрегатов.

Отсюда

$$\sigma_{m-m_1} = \sqrt{D_{m-m_1}} = \sqrt{W_{a(m-m_1)}^2 - W_{a(m-m_1)}^2}, \quad (27)$$

где: D — дисперсия случайной величины при $m = m_1$, соответствующая $\tau_{\Sigma m} = \tau_{\Sigma(m-m_1)} \geq \tau_3$.

Стоящий под знаком корня начальный момент второго порядка случайной величины (математическое ожидание второй степени) по аналогии с моментом первого порядка и на тех же основаниях определяется следующим образом:

$$W_{am}^2 = \sum_{m=0}^{m-m_1} (W_{am})^2 \tau_m = \sum_{m=0}^{m-m_1} (P m \tau_m t_m)^2 \tau_m = P \sum_{m=0}^{m-m_1} m^2 \tau_m^3 t_m^2. \quad (28)$$

Наибольшая ожидаемая выработка электроэнергии от резервных агрегатов

$$W_{an} = W_{a(m-m_1)} = W_{a(m-m_1)} + 3\sigma_{(m-m_1)}. \quad (29)$$

Дальнейший расчет выполняется совершенно аналогично расчету $P_{a\text{cp}}^{(a)}$. При этом определяются ожидаемый максимальный недоотпуск

электроэнергии $\Delta W_{ам}$ и ущерб от него в промышленности $A_{ум}$, а также годовые затраты на резервную мощность $A_{ам}$.

В соответствии с этим условие выбора аварийного резерва при максимальном дефиците выработки запишется так:

$$A_{км} = \text{минимуму.} \quad (30)$$

Необходимая резервная мощность будет равна

$$P_{ам}^{(9)} = P_{м_2}^{(9)}, \quad (31)$$

где $m_2^{(9)}$ — число агрегатов, соответствующее минимуму величины $A_{км}$ (30).

Таким образом, в итоге расчета получается два минимума общих затрат, которым отвечают вполне определенный уровень резерва и обеспеченности электроснабжения. Большее из полученных значений можно рассматривать как необходимое, экономически обоснованное количество резервных агрегатов по условиям аварийности оборудования электростанций. Принятая резервная мощность должна создавать экономически оправданную надежность электроснабжения $\tau_{зм}^{(9)}$. Очевидно, что последняя будет всегда меньше, чем $\tau_{зм} = \tau_3$, а поэтому и $m_1^{(9)}$ (или $m_2^{(9)}$) будет всегда меньше, чем m_1 .

В заключение отметим, что аварийный резерв вплоть до определения его экономической величины участвует в расчетах в виде приближенного значения, взятого по усредненным нормам. Последнее в дальнейшем уточняется до экономической (действительной) величины $P_{аг}$, которая и включается в состав действительной установленной мощности, окончательно равной

$$P_{yx} = P_y - P_a + P_a, \quad (32)$$

где расчетная установленная мощность $P_y = P_{nm} + P_p + P_a$. Такой прием широко применяется в практике проектирования, использован он и в данном случае.

ВЫВОДЫ

1. Расчеты по выбору электрического резерва в системах требуют дальнейшего совершенствования, причем большое значение имеет учет времени фактической потребности в резерве.
2. Ремонтная мощность может быть выбрана из условий, исключаяющих ее использование, помимо прямого назначения.
3. Частотный резерв целесообразно привести к нагрузкам и включить в общий график электропотребления. Соответствующие коррективы достаточно выполнить лишь за время отсутствия свободной рабочей мощности.
4. При условиях, указанных в пунктах 2 и 3, нарушение нормально-го электроснабжения может возникнуть только из-за аварийности оборудования. В связи с этим экономически обоснованная величина аварийного резерва, по существу, определяет обоснованную величину полной резервной мощности.

5. Расчет аварийного резерва должен базироваться на определении минимума «расчетных затрат» с учетом времени работы резервных агрегатов.

6. Методика ВГПИ «Теплоэлектропроект» может служить основой для данного расчета.

Томский
политехнический институт

Поступила в редакцию
17/VII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Определение ожидаемой величины выхода в аварийный ремонт агрегатов на электростанциях, ВГПИ «Теплоэлектропроект», М., 1958.
2. Методика определения аварийного резерва мощности при проектировании энергосистем, ВГПИ «Теплоэлектропроект», М., 1955.
3. Н. С. Афонин, Надежность электроснабжения промышленных предприятий, М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.

С. Г. СОКОЛОВ

НОВЫЙ ПРИНЦИП КОНСТРУИРОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Важнейшей проблемой в области высоковольтных линий электропередач является повышение напряжений за счет снижения уровней электрической изоляции [1].

Одной из причин, мешающих снижению уровней изоляции, является несовершенство применяемых конструкций изоляторов. Объясняется это тем, что до последнего времени не было четкого представления о процессе их загрязнения, не ясна была физическая картина возникновения и развития разряда по поверхности изолятора. При проектировании не учитывались аэродинамические характеристики изоляторов, определяющие их загрязнение; не учитывалось влияние формы изолятора на увлажнение и подсушивание его поверхности, что имеет важное значение при возникновении разряда.

Исследование аэродинамических и электрических характеристик изоляторов, выполненное Транспортно-энергетическим институтом СО АН СССР, позволило разработать новый метод подхода к проектированию изоляторов [2]. Этот метод, основанный на учете аэродинамических характеристик, позволяет создавать конструкции юбочных изоляторов с меньшей длиной пути утечки, но обладающих повышенными разрядными напряжениями.

Исследования поверхностного разряда, выполненные в последнее время, позволили глубже изучить процесс возникновения и развития разряда на поверхности высоковольтного изолятора [3].

Установлено, что возникновение поверхностного разряда начинается на участках, имеющих наибольшее поверхностное сопротивление, т. е. на подсушенных местах, на которые приходится большее падение напряжения. Для развития разряда и полного перекрытия изолятора необходимо, чтобы проводимость на единицу длины канала дуги была больше проводимости на единицу длины пути утечки вдоль сохранившегося проводящего слоя. В этом случае канал дуги удлиняется за счет проводящего слоя и происходит перекрытие изолятора. Из падающей вольтамперной характеристики дуги следует, что падение напряжения на единицу длины дуги при увеличении тока уменьшается, что способствует дальнейшему распространению дуги.

У обычных юбочных изоляторов имеются благоприятные условия для образования участков с различным сопротивлением. Это можно наблюдать во время дождя, а также при неравномерном загрязнении изоляторов.

Исследование возникновения и развития разряда по поверхности было проведено на юбочном опорном изоляторе типа СТ-35. Верхние поверхности юбок изолятора покрывались слабым раствором NaCl, а нижние оставались сухими. Таким образом моделировались условия смоченных и подсушенных участков на изоляторе.

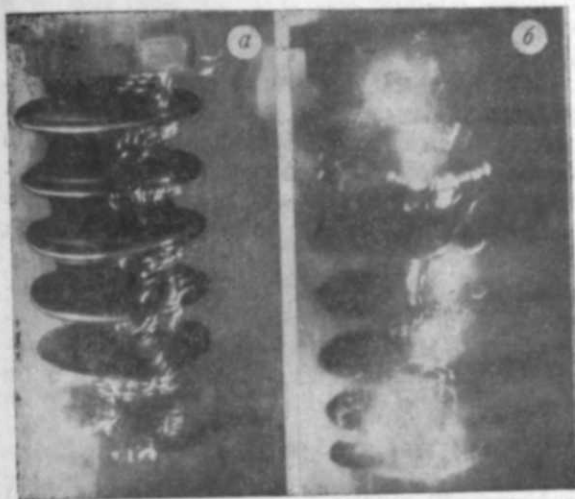


Рис. 1. Процесс развития разряда по опорному изолятору СТ-35:

а — начало разряда, б — развитие разряда.

имеют относительно большую площадь; по-видимому, эти участки на поверхности изолятора не являются главной изоляцией при дожде, как это считалось ранее, а, наоборот, служат местом для возникновения перемежающихся дужек и разряда. Рис. 1, б показывает процесс развития разряда, заканчивающийся полным перекрытием изолятора.

Подсушенные участки на изоляторах раньше всего возникают в местах наименьшей смоченности, а также в местах наибольшей плотности тока утечки. Характерным с этой точки зрения является изолятор типа П-4,5, на нижнюю часть поверхности которого, меньше смачивающуюся при дожде, приходится наибольшая плотность тока. Здесь, у внутреннего электрода, и возникает разряд. По мере повышения напряжения каналы удлиняются и происходит полное перекрытие изолятора (рис. 2, а).

Приведенные примеры показывают, что образование на изоляторе участков с различным поверхностным сопротивлением приводит к преждевременному возникновению перемежающихся дужек и снижению разрядного напряжения. Поэтому возникает необходимость создания таких конструкций изоляторов, которые бы подвергались меньшему и в то

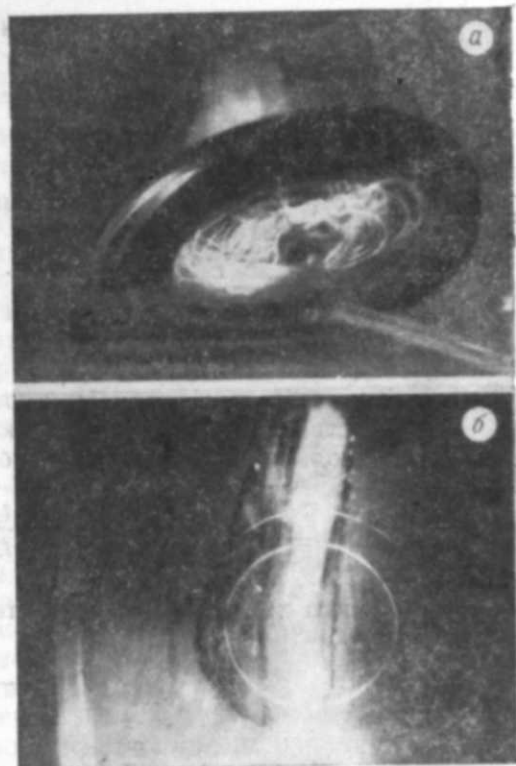


Рис. 2. Процесс развития разряда на юбочном (а) и плоском (б) изоляторах.

же время равномерному загрязнению, равномерно увлажнялись и подсушивались.

Одним из путей решения этой проблемы является создание высоковольтных изоляторов винтообразной формы, которая обеспечивает равномерное смачивание поверхности во время дождя. Проведенные ТЭИ СО АН СССР совместно с ЛФГИЭКИ исследования электрических характеристик винтообразных изоляторов показали, что по своим характеристикам они не уступают обычным юбочным изоляторам, а в некоторых случаях превосходят их [4].

Возникновение и развитие поверхностного разряда зависят не только от формы изолятора, но и от величины его поверхности. Для появления начальной дужки необходимо, чтобы ток, протекающий по поверхности, был не менее критического [3]. Сопротивление проводящего слоя на поверхности изолятора определяется по формуле

$$R = \frac{1}{\gamma} \int_0^L \frac{dl}{\pi D(l)} = \frac{L}{\pi \gamma D_s}, \quad (1)$$

где γ — удельная поверхностная проводимость;
 L — длина пути утечки;

D_s — эквивалентный диаметр изолятора, равный $D_s = \frac{1}{\frac{1}{L} \int_0^L \frac{dl}{D(l)}}$.

Ток утечки вдоль поверхности изолятора

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{L} \pi \gamma D_s, \quad (2)$$

где U — напряжение, приложенное к изолятору.

С другой стороны, экспериментально установлена связь между средним градиентом вдоль канала горячей дуги и проходящим через него током [3]

$$E_{\text{ср}} = a + \frac{b}{I}, \quad (3)$$

где a, b — постоянные, зависящие от условий горения дуги.

Равенства (2) и (3) позволяют записать условия возникновения разряда вдоль проводящей поверхности изолятора в виде

$$a + \frac{b}{I} < \frac{U}{L} = \frac{I}{\pi \gamma D_s}. \quad (4)$$

Величина критического тока утечки определяется равенством

$$I_{\text{кр}} = \frac{b}{\frac{U}{L} - a} \quad (5)$$

или

$$I_{\text{кр}} = \frac{1}{2} a \pi \gamma D_s \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4b}{a^2 \pi \gamma D_s}} \right), \quad (6)$$

т. е. чем больше γ и чем больше поверхность изолятора, тем больше величина критического тока.

Из равенства (3) и (6) определяется величина разрядного градиента

$$\frac{U}{l} \geq \frac{a}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4b}{a^2 \pi \gamma D_s}} \right) = \sqrt{\frac{b}{\pi \gamma D_s}}. \quad (7)$$

Разрядный градиент, отнесенный к длине пути утечки, возрастает при уменьшении удельной проводимости поверхности изолятора и уменьшении эквивалентного диаметра. Последнее объясняется тем, что уменьшение эквивалентного диаметра и поверхности изолятора при заданной величине γ приводит к уменьшению тока через канал первой дужки. Это в соответствии с равенством (3) приводит к увеличению среднего градиента вдоль канала дуги. В то же время средний градиент вдоль сохранившейся части проводящего слоя не зависит от диаметра изолятора.

Следовательно, для уменьшения величины критического тока и повышения разрядного градиента, при котором возникает первичная дужка, необходимо уменьшить диаметр и поверхность изолятора.

Проведенное исследование процесса возникновения и развития разряда по поверхности изолятора позволило сформулировать оптимальные требования к конструкциям изоляторов: а) изолятор должен быть хорошо продуваем и обтекаем, благодаря чему уменьшаются его загрязнение и поверхностная проводимость; б) форма изолятора должна обеспечивать его равномерное увлажнение и высыхание, а следовательно, и выравнивание напряжения по поверхности изолятора; в) изолятор должен иметь минимальную поверхность, что способствует уменьшению критического тока через канал первичной дужки и повышению разрядного градиента.

Как было показано выше, конструкции юбочных изоляторов не удовлетворяют в полной мере перечисленным требованиям. При проектировании юбочных изоляторов не учитываются их аэродинамические характеристики, что приводит к ненужной сложности конструкций, подверженных повышенному загрязнению, зонтообразная форма изоляторов не обеспечивает их равномерного увлажнения и высыхания, следствием чего является неравномерность распределения напряжения по изолятору; большая поверхность изолятора способствует увеличению критического тока и снижению разрядного градиента.

В настоящей статье излагается новый принцип конструирования высоковольтных изоляторов, отвечающих указанным выше требованиям.

Выпускаемые промышленностью обычные изоляторы принято характеризовать двумя параметрами: разрядным напряжением и пробивным напряжением. Первый определяется состоянием поверхности изолятора, а второй — толщиной фарфора. Воздух как изолирующая среда у юбочных изоляторов не учитывается.

Новый принцип конструирования предусматривает создание высоковольтных изоляторов плоской формы, у которых в качестве изоляции используются ажурные с малой поверхностью конструкции из твердого изоляционного материала и воздушный промежуток.

На рис. 3. представлены элементы и конструкции как подвесных, так и опорных изоляторов. На основе предлагаемого принципа может быть создано множество разнообразных форм, в том числе сплошных изоляционных конструкций, которые заменят гирлянды и траверсы высоковольтных опор.

Ажурность конструкций, хорошая их обтекаемость и продуваемость обеспечивают минимальное их загрязнение и лучшую самоочистку ветром и самообмывку дождем, чем достигается снижение поверхностной проводимости. Во время дождя изоляторы плоской формы будут иметь равномерную смоченность всей поверхности, а следовательно, равномерное распределение напряжения по изолятору. Все это говорит о том, что внешние факторы будут оказывать меньшее влияние на электрические характеристики плоских изоляторов по сравнению с юбочными.

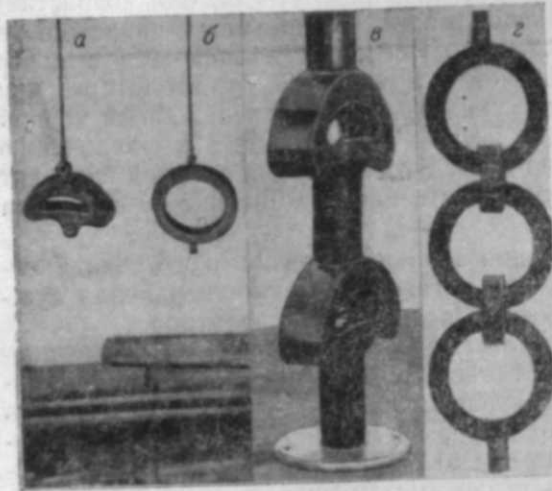


Рис. 3. Элементы и конструкции плоских изоляторов:
а — полукольцо, б — кольцо, в — опорный изолятор,
г — подвесной изолятор.

показывают, что на электрическую прочность воздуха внешние факторы влияют меньше, чем на твердую изоляцию, т. е. электрические характеристики воздуха являются более стабильными. При слабом загрязнении ажурных конструкций плоских изоляторов это позволяет повысить стабильность их характеристик и обеспечить надежность работы оборудования при сниженных уровнях изоляции.

Подбирая размеры ажурных конструкций и воздушного разрыва, можно добиться такого положения, когда разряд будет всегда проходить по воздуху, что исключит повреждение изолятора.

Для подтверждения отмеченных положительных характеристик изоляторов плоской формы, а также предлагаемого нового принципа конструирования высоковольтных изоляторов нами были проведены широкие экспериментальные исследования электрических характеристик изоляторов плоской формы при искусственном и естественном их загрязнении и увлажнении.

В естественных условиях проводились исследования при зимних и летних загрязнениях, при морозящем дожде и тумане; в лабораторных условиях — при влажности от 60 до 100%, при загрязнении изоляторов в аэродинамическом канале и при искусственном дождевании. Исследованию были подвергнуты плоские изоляторы в виде колец и деформированных полуколец (см. рис. 3, а, б), изготовленных из эпоксидного компаунда и оргстекла. Все исследования велись в сравнении с фарфоровыми и стеклянными юбочными изоляторами типа П-4,5. Плоские и юбочные изоляторы имеют одинаковую длину пути утечки, что позволяет непосредственно сравнивать величины разрядных напряжений.

Рассмотрим условия возникновения и развития разряда у плоских изоляторов без учета внешних факторов.

Из данных [3] следует, что чем меньше поверхность изолятора при данной τ , тем меньше критический ток и, согласно соотношению (3), выше разрядный градиент. Следовательно, при одинаковой длине пути утечки разрядное напряжение по образующей у плоского изолятора будет выше, чем у юбочного. Величина разрядного напряжения у плоского изолятора будет определяться электрической прочностью воздушного разрыва.

Литературные данные [5, 6] и наши исследования

Для искусственного загрязнения изоляторов портланд-цементом использовался аэродинамический канал сечением $0,5 \times 0,5$ м, длиной 25 м. Загрязнение производилось при скорости потока 11 м/сек. Влияние естественных климатических факторов и загрязнений на электрические характеристики изоляторов определялось на открытом высоковольтном стенде полевой лаборатории. В результате исследований получено большое количество данных, часть которых приведена в таблице.

Экспериментальные данные показывают, что во всех случаях поверхностное сопротивление у плоских изоляторов на 2 и более порядка выше, чем у юбочных. Следовательно, ток утечки у них соответственно будет меньше.

Разрядное напряжение у изоляторов в виде полуколец в большинстве случаев имеет величины, близкие к юбочным изоляторам П-4,5. Изолятор, имеющий форму кольца, с большим разрывом по воздуху, выдерживает большие разрядные напряжения, чем юбочные. Только в одном случае при искусственном загрязнении разрядное напряжение кольцевого изолятора имело такую же величину, что и юбочные. Это объясняется тем, что исследовался изолятор плохо обтекаемой формы (в сечении прямоугольник) и при загрязнении он располагался к потоку не ребром, а плоскостью. В этом случае при испытаниях разряд проходил не через воздушный промежуток, а по загрязненной плоскости. Во всех, за редкими исключениями, случаях разряд у плоских изоляторов проходил не по образующей, а через воздушный промежуток (см. рис. 2, б).

Повышенные разрядные напряжения у кольцевого изолятора объясняются тем, что он имеет больший воздушный разрыв, чем изолятор в виде деформированного полукольца.

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили отмеченные выше преимущества изоляторов плоской формы.

В большинстве случаев разряд на плоских изоляторах проходил через воздушный промежуток и величина разрядного напряжения у кольцевого изолятора была больше, чем у юбочных, т. е. плоские изоляторы по поверхности имеют запас электрической прочности. Это объясняется меньшей загрязняемостью и особенностями конструкции плоских изоляторов, имеющих меньшую поверхность по сравнению с юбочными.

Плоские изоляторы имеют повышенные разрядные напряжения при ливневом дожде, тумане, вероятно, благодаря равномерной их смоченности.

Плоские изоляторы имеют также ряд других преимуществ: они во много раз легче юбочных, проще в изготовлении; отсутствие в гирляндах металлических соединителей позволяет сократить разрядные расстояния, снизить уровни изоляции и уменьшить габариты опор.

Очевидно, что ажурные конструкции изоляторов должны быть механически прочными. Поэтому изготовление их требует прочных изоляционных полимерных материалов. В настоящее время созданы полимеры, которые в сочетании со стекловолокном по удельной прочности не уступают стали, а иногда даже превышают ее (например, стеклопластики на основе полиэфирных смол). Это говорит о том, что на основе современных достижений химии полимеров создание изоляторов плоской формы с заданными механическими свойствами не представляет принципиальной трудности. Кроме того, здесь открываются еще и другие возможности. Обладая высокой технологичностью как в части литья, так и в части механической обработки, полимерные изоляционные материалы позволяют просто изготавливать любые конструкции плоских изоляторов, усиливать конструкции за счет введения в них металлических

Результаты испытаний изоляторов при искусственном и естественном загрязнении и увлажнении (1962 г.)

Дата	Условия испытаний	Средние значения разрядных напряжений при плавном подъеме, кВ действ.				Поверхностное сопротивление, ом			
		плоское эпоксидное кольцо	плоское эпоксидное полукольцо	фарфоровый выд П-4,5	стеклянный П-4,5	плоское эпоксидное полукольцо	плоское полукольцо из оргстекла	фарфоровый П-4,5	стеклянный П-4,5
	Длина пути утечки, мм	251	255	270	250	—	—	—	—
	Воздушный разрыв, мм	140	50	—	—	—	—	—	—
	Сечение, мм	30×30	25×30	—	—	—	—	—	—
	Вес, г	780	425	5900	4080	—	—	—	—
13.III	На изоляторе изморозь	—	86	89	70	1,8·10 ¹²	1,9·10 ¹¹	10 ⁹	9,5·10 ⁸
17.III	Идет снег	—	78	91	80	3,4·10 ¹¹	3,4·10 ¹¹	2·10 ⁹	1,4·10 ⁸
22.III	Солнце, тихо	—	80	88	78	2·10 ¹²	8·10 ¹¹	7,5·10 ⁸	2,9·10 ⁸
3.IV	Изоляторы забиты снегом	—	66	74	69	2,3·10 ⁹	8·10 ⁹	3,5·10 ⁷	6·10 ⁷
19.IV	На изоляторе капли воды	—	70	83	67	8·10 ¹²	8·10 ¹²	1,8·10 ¹⁰	10 ⁹
	В гиростате влажн. 100%	—	58	58	61	1,8·10 ¹⁰	1,6·10 ⁸	10 ⁶	10 ⁷
	» 80%	—	78	80	62	10 ¹²	10 ¹¹	2·10 ⁸	10 ⁸
	» 60%	—	69	70	71	10 ¹²	1,6·10 ¹¹	5·10 ⁷	9·10 ⁷
4.IX	После загрязнения в аэроканале	31	25	34	31	—	—	—	—
	Естественное загрязнение и увлажнение	60	46	37	37	—	—	—	—
12.IX	Моросит дождь	80	63	76	66	—	—	—	—
24.IX	Туман, изолятор покрыт влагой	74	46	46	46	—	—	—	—
	Искусственный дождь, 5 мм/мин	71	63	51	55	—	—	—	—
	Импульсное напряжение 50%, при (+) полярности, 2 мк/сек	185	110	120	110	—	—	—	—

Примечание. Разброс разрядных напряжений не превышал 5%.

экранов. Этот путь дает возможность уже теперь изготавливать плоские изоляторы с высокой механической прочностью из эпоксидного компаунда, широко применяемого в высоковольтных установках.

Расчеты показывают, что теперь при относительно высокой стоимости эпоксидного компаунда стоимость изготовления плоского изолятора не превышает стоимости фарфорового юбочного изолятора, так как, например, на изготовление одного плоского изолятора расходуется всего 250—350 г эпоксидной смолы. Остальное составляет наполнитель — кварцевый песок.

При снижении стоимости полимеров экономическая выгода будет очевидной.

ВЫВОДЫ

1. Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили правильность предлагаемого нового принципа конструирования высоковольтных изоляторов.

2. Изоляторы и изоляционные конструкции плоской формы могут применяться как в качестве линейной, так и в качестве аппаратной изоляции.

3. При одинаковой длине пути утечки и одинаковых внешних условиях плоские высоковольтные изоляторы обладают лучшими электрическими характеристиками по сравнению с юбочными.

4. Применение изоляторов плоской формы позволит снизить уровни изоляции ЛЭП, удешевить стоимость их строительства и облегчить решение проблемы создания линий электропередач на напряжение 1000 кВ и выше.

Транспортно-энергетический институт
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
11/1 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Акодис, Перенапряжения и уровни изоляции в сетях напряжением 110 кВ и выше. Матер. межвузовск. совещ. по повышению напряжения ЛЭП, за счет снижения уровня изоляции. Свердловск, 1961.
2. С. Г. Соколов, К вопросу проектирования высоковольтных изоляторов для районов с повышенным загрязнением. Электрические станции, № 7, 1962.
3. Г. Н. Александров, В. Е. Кизеветтер, Развитие разряда вдоль проводящей поверхности высоковольтной изоляции. Изв. высших учебн. завед., № 5, 1962.
4. С. Г. Соколов, В. Н. Трусова, Ю. Н. Яшин, Отчет «Электрические и аэродинамические характеристики винтообразных изоляторов». Фонды ТЭИ СО АН СССР, 1962.
5. А. И. Сиротинский, Техника высоких напряжений. Госэнергоиздат, 1951.
6. E. Kuffel, A. S. Husband, The breakdown of gars. Electr. Rev., 1961, 168, № 9, 370—372.

А. П. МЕРЕНКОВ, В. Я. ХАСИЛЕВ

РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ ОПТИМИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН (ЭВМ)

В развитии энергетики СССР большое значение имеет централизация теплоснабжения городов и промышленных комплексов. Ежегодно затрачиваются крупные средства и большое количество металла в трубах на строительство тепловых сетей различных типов. Весьма актуальным поэтому является технико-экономическое обоснование диаметров труб и напоров в тепловых сетях. До сих пор методы таких расчетов применительно к использованию возможностей ЭВМ отсутствовали.

Под экономической оптимизацией тепловой сети понимается определение ее параметров, соответствующих минимуму общих расчетных затрат [1]. В случае разветвленной сети для этого необходимо обеспечить оптимальную взаимную увязку потерь напора по всем ее ответвлениям, что представляет основную трудность. В практике проектных организаций до настоящего времени диаметры труб выбираются на основе линейного закона распределения напоров и некоторых стандартных нормативов для удельных потерь напора.

Как известно [2], кривые, выражающие зависимость общих расчетных затрат от величины потери напора в сети, характеризуются значительной пологостью в области минимума. В этом отношении тепловые сети существенно отличаются, например, от линейных электрических сетей. Именно учитывая этот пологий характер изменения величины общих расчетных затрат, расчет тепловых сетей должен производиться по некоторой «зоне» вокруг оптимальной точки для того, чтобы иметь возможность варьировать оптимальными параметрами сети с целью удовлетворения как экономических, так и эксплуатационных требований. В этом и состоит идея комплексного расчета. Но для этого с самого начала необходимо знать исходные параметры сети, соответствующие оптимальной точке.

В данной статье рассматривается оптимизация и дальнейший расчет произвольной разветвленной тепловой сети с одним источником тепла, для которой справедлива методика расчета переменных режимов, основанная на свертываемости матрицы совпадений независимых контуров и ветвей к единичному контуру. При этом учитываются переменные режимы, связанные только с дискретными изменениями расходов теплоносителя в узлах сети. Это соответствует следующим дискретным возмущениям режима ее работы: полные отключения и включения на участках, отключение нагрузки горячего водоснабжения, а также другие суточные, сезонные и перспективные изменения нагрузок в сети. Такой постановке удовлетворяет большой класс задач, возникающих при проектировании и эксплуатации сетей.

В соответствии с этим рассматриваемый расчет состоит из решения двух последовательных задач: а) оптимизации параметров разветвлен-

ной тепловой сети с точки зрения минимума общих расчетных затрат; б) взаимной увязки экономических и эксплуатационных требований для обеспечения гидравлической устойчивости сети по отношению к заданным дискретным возмущениям режима ее работы.

В общем случае первая задача оптимизации является математической задачей нелинейного программирования и характеризуется следующими особенностями.

1. Система условий представляет систему линейных уравнений для падений напоров ΔH_i на участках ($i=1, 2, \dots, N$, где N — число участков сети), число уравнений которой меньше числа неизвестных.

2. Критериальная функция — минимум общих расчетных затрат [2]:

$$Z = \sum_{i=1}^N [AG_i \Delta H_i + Bl_i f_c(d_i) + Cl_i f_T(d_i)], \quad (1)$$

где l_i — длина участка; G_i — общий расход теплоносителя на участке; d_i — диаметр трубы; $f_c(d_i)$ и $f_T(d_i)$ — таблично заданные нормативы удельных стоимостных показателей по прокладке трассы сети и по теплотерям в зависимости от диаметра; A , B и C — коэффициенты, зависящие от технико-экономических показателей (себестоимости электроэнергии, нормативного коэффициента окупаемости капиталовложений и др.), является нелинейным функционалом, поскольку

$$\Delta H_i = \frac{\varphi(k) l_i G_i^2}{d_i^{5,25}}, \quad (2)$$

где $\varphi(k)$ — коэффициент, зависящий от шероховатости труб.

Таким образом, одни слагаемые функционала (1) задаются аналитическими выражениями, а другие имеют таблично задаваемые величины, которые зависят от многих факторов и меняются в зависимости от конкретных сетей. В частности, каждый раз необходимо исследовать вопрос о выпуклости функционала, прежде чем сводить эту задачу к задаче выпуклого программирования, особенно в тех частых случаях, когда для отдельных участков трассы применяются различные типы прокладок в различных грунтах, когда используются трубы двух сортов и пр.

3. Неизвестные ΔH_i , в свою очередь, являются функциями от искомым d_i , причем ΔH_i определены только на дискретном множестве возможных стандартных значений d_i .

При такой постановке основными переменными являются падения напоров ΔH_i . Если же за основные переменные взять непосредственно диаметры d_i или сопротивления S_i участков, то нелинейными будут и система условий, и функционал.

В работе [3] авторами был предложен метод для решения этой задачи оптимизации, сущность которого заключается в следующем. Для каждого узла сети выбирается диапазон возможных значений напора, в котором рассматривается некоторый дискретный ряд — базисные значения. Этот ряд может быть равномерным или произвольным набором возрастающих значений. Не упрощая задачи, можно взять один и тот же диапазон для всех узлов, кроме конечных, где напор принимается равным нулю. В качестве возможных рассматриваются изменения напора — пьезометры — только через базисные значения в узлах. После перебора вариантов очередного участка разветвленной сети запоминаются не все, а только оптимальные пьезометры, начинающиеся базис-

ными значениями в начале данного участка. Эти пьезометры последовательно «наращиваются» по участкам, начиная от конечных потребителей и до источника тепла. Затем они сравниваются между собой по величине своих общих расчетных затрат; наилучший среди них и будет оптимальным.

Таким образом, данный метод существенным образом использует линейность системы условий. Поэтому его можно было бы назвать методом последовательного построения ограниченного множества решений этой системы, содержащего в себе оптимальное решение. Следует подчеркнуть также следующие отличительные черты этого метода:

а) он независим от вида функционала (1), который служит простотой критериальной характеристикой перебираемых решений, и поэтому практически применим в условиях произвольного критерия,

б) автоматически позволяет определить оптимальную величину общего напора H_0 без всяких априорных предположений о характере распределения напоров по участкам сети,

в) позволяет получать оптимальное распределение любого заданного общего напора,

г) не требует замены табличных показателей приближенными аналитическими выражениями,

д) позволяет осуществлять поиск оптимального решения только для стандартных диаметров труб и автоматически снимает вопрос о необходимости округления теоретических диаметров до стандартных значений, который возникает при аналитических расчетах.

Алгоритм, реализующий этот метод на ЭВМ, легко «оснащается» учетом различных технических ограничений. К их числу относится учет рельефа местности при оценке давлений в обратной магистрали, максимально допустимых по стандарту труб и арматуры давлений в сети, дискретности набора сетевых насосов при выборе H_0 и т. п.

В комплексном расчете экономическая оптимизация выступает в качестве исходного этапа. Очевидно, что она имеет и самостоятельное значение. В частности, ее результаты будут окончательными для автоматизируемых тепловых сетей.

Данный метод реализован в стандартной программе на БЭСМ-2 для оптимизации параметров разветвленной тепловой сети. Максимальное допустимое число участков — 125, время работы — от 10 мин до 1 ч. С ее помощью было рассчитано несколько крупных городских сетей. Эти же сети были до этого рассчитаны в проектных организациях, на основе линейного закона распределения напоров.

Полученные в результате расчетов на БЭСМ-2 оптимальные характеристики этих сетей — величина капиталовложений и общий вес требуемого металла — оказались меньше на 10—15% сравнительно с данными проектных организаций. Анализ результатов расчета показывает, что применяемые на практике расчеты дают заниженные удельные потери напора. Получаемую на ЭВМ неравномерность в распределении напоров по участкам нельзя объяснить только округлением диаметров до стандартных значений. Она соответствует оптимальной увязке падений напоров по всем магистральным участкам и ответвлениям и зависит от конкретных особенностей каждой сети. Чем разветвленнее сеть, тем более результаты расчетов на ЭВМ по предлагаемой методике будут отличаться от расчетов, основанных на линейном распределении напора по главной магистрали.

Дальнейший расчет необходим для взаимной увязки полученных оптимальных параметров сети с эксплуатационными требованиями к гидравлической устойчивости (жесткости) сети. В качестве критерия

гидравлической устойчивости принимаются задаваемые для каждого потребителя или группы потребителей допустимые пределы p и q относительного изменения расходов теплоносителя при дискретных возмущениях режима ее работы (см. выше):

$$G(1-p) \leq G' \leq (1+q), \quad (3)$$

где p — допустимое относительное изменение расхода в сторону его увеличения,

q — то же, в сторону уменьшения,

G — расчетное значение расхода теплоносителя, применительно к которому производилась оптимизация,

G' — допустимая величина переменного расхода у данного потребителя.

Определение величин p и q , дифференцированно для различных типов зданий, представляет самостоятельную задачу.

Для анализа гидравлической разрегулировки сети при заданных дискретных возмущениях требуется проделать расчет ее соответствующих переменных режимов. Подобный расчет немыслим при ручной технике счета и потому до сего времени не производился. Исходными данными для него могут служить, вообще говоря, не только оптимальные параметры сети, но и результаты расчета по любому из приближенных методов.

Предварительно рассмотрим изменения в гидравлическом режиме сети при полном отключении одного из ее участков. Анализируемая в связи с этим сеть показана на схеме. Она состоит из одной магистрали и ряда ответвлений, для которых показаны только их начальные участки.

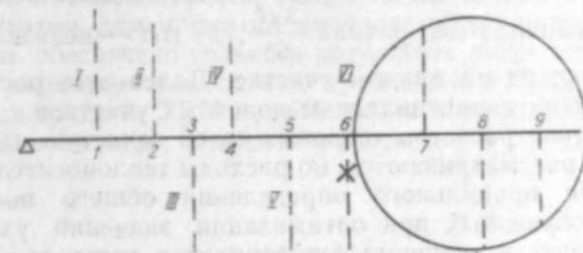


Схема сети с отключаемым участком. (Арабскими цифрами обозначены номера узлов, римскими — номера ответвлений, крестиком обозначен отключаемый участок).

Очевидно, что при $H_0 = \text{const}$ возмущение на любом участке приводит к изменению напора во всех узлах сети. Эти изменения будут различными в зависимости от расположения узлов по отношению к возмущению. Изменение напора в узле на δH изменит расходы у всех потребителей, снабжаемых от этого узла, в одной и той же пропорции:

$$G' = \sqrt{\frac{H + \delta H}{S}} = G \sqrt{1 + \frac{\delta H}{H}}, \quad (4)$$

где S — общее сопротивление всей части сети, начинающейся от этого узла.

Предположим, что отключается участок, отходящий от 6-го узла, с расходом G^* . Как известно, за счет недостаточной гидравлической устойчивости сети уменьшение общего расхода ΔG будет меньше, чем G^* .

Поэтому избыточный расход $G^* - \Delta G$ соответствующим образом распределится между оставшимися потребителями. Так как общие расходы теплоносителя на участках магистрали станут меньше, то новые значения напоров H_i в ее узлах по мере приближения к отключенному участку будут все более отличаться от предыдущих значений H_i , так что

$$\delta H_1 < \dots < \delta H_i < \dots < \delta H_n, \quad \delta H_i = H_i' - H_i. \quad (5)$$

Таким образом, только последовательность участков сети от источника до отключенного участка характеризуется непропорциональным изменением узловых напоров. В данном случае (см. римские цифры на схеме):

$$f_1 = \frac{G_1'}{G_1} = \sqrt{1 + \frac{\delta H_1}{H_1}}; \dots; f_6 = \frac{G_{VI}'}{G_{VI}} = \sqrt{1 + \frac{\delta H_6}{H_6}} \quad (6)$$

$$f_{\min} = f_1 < \dots < f_6 = f_{\max}. \quad (7)$$

При расчете переменных режимов для каждого рассматриваемого возмущения необходимо подсчитывать общее сопротивление сети. Отметим некоторые особенности, которые возникают в связи с этим при использовании ЭВМ.

1. Экономическая оптимизация, как и любой гидравлический расчет, основанный на трубах стандартных диаметров, не дает полной увязки потерь напора. При эксплуатации эти невязки компенсируются дросселированием на вводах у потребителей. В расчете это дросселирование учитывается тем, что к сопротивлению каждого конечного участка добавляется величина ΔS , равная $\frac{\Delta H}{G^2}$, где ΔH — невязка конечного напора, а G — расход на данном участке. Далее весь расчет ведется по этим «увязанным» сопротивлениям конечных участков.

2. В практике расчетов тепловых сетей зачастую некоторые участки на схеме не рассматриваются, но расходы теплоносителя учитываются полностью для правильного определения общего пьезометра сети. С помощью полученных при оптимизации значений узловых напоров можно определить и величину сопротивления каждого такого неявного ответвления, которую также необходимо учитывать в расчете.

3. При подсчете общего сопротивления параллельно подключенных участков необходим предварительный сравнительный анализ величин сопротивлений и преобразование формулы для того, чтобы избежать переполнения разрядной сетки БЭСМ-2.

В алгоритме для анализа гидравлических режимов заданные дискретные возмущения рассматриваются в произвольной последовательности. Для каждого из них этот анализ состоит в следующем:

1. Определяется новое, в результате возмущения, общее сопротивление S' сети и новый общий расход G' :

$$G' = \sqrt{\frac{H_0}{S'}} = G \sqrt{\frac{S}{S'}}. \quad (8)$$

2. После этого последовательно подсчитываются новые общие расходы на ответвлениях в узлах сети, начиная от источника и до рассматриваемого возмущения режима, и соответствующие им значения f_i . В результате получается определенная последовательность этих значений, характеризующая гидравлическую разрегулировку сети. Она оце-

нивается теперь по заданным величинам p и q допустимого относительного изменения расходов. Далее эти величины предполагаются одинаковыми для всех потребителей.

В случае, когда $f_{\max} < 1 + q$, разрегулировка не превышает заданного предела. При $f_{\max} > 1 + q$ необходимо обеспечивать гидравлическую устойчивость сети. Прежде всего проверяется возможность уменьшения общего напора с помощью центрального регулирования. Если H_0 уменьшить в γ^2 раз, где $\gamma = \frac{f_{\max}}{1+q} > 1$, то все расходы уменьшатся в γ раз и тем самым величина f_{\max} будет понижена до заданного верхнего предела. Но имеется, однако, нижний предел, обусловленный заданной величиной p . Если $\frac{f_{\min}}{\gamma} > 1 - p$, то центральное регулирование оказывается достаточным. При $\frac{f_{\min}}{\gamma} < 1 - p$ необходима корректировка диаметров или применение автоматики у потребителей.

Корректировке подлежат те ответвления, для которых $\frac{f_i}{\gamma} < 1 - p$.

Ясно, что если для всех участков сети задать бесконечно большие диаметры труб, то только в этом случае сеть будет обладать абсолютной жесткостью. Поэтому очевидно, что некоторые возмущения принципиально нельзя откорректировать, не говоря уже об экономической абсурдности беспредельного увеличения диаметров.

Решение вопроса заключается в постоянной оперативной — центральной и местной — регулировке сети при эксплуатации, что возможно лишь при более или менее полной автоматизации тепловых сетей. Комплексный расчет и корректировка оптимальных параметров сети являются необходимыми для принятия окончательных проектных решений. Это может быть обеспечено только в результате рассмотренного численного анализа характеристик сети с применением быстродействующих вычислительных средств. ЭВМ позволяют за короткое время проверить несколько вариантов схем, режимов работы с учетом динамики развития сети.

ВЫВОДЫ

Выполненные на БЭСМ-2 комплексные расчеты разветвленных тепловых сетей различных объемов и конфигураций показали существенную эффективность применения ЭВМ и для практики, и для исследовательских целей в этой области.

Предлагаемая методика дает экономию расчетных затрат в среднем на 10—15%. Это достигается оптимизацией общего напора и оптимальным распределением его в сети, что практически недостижимо при ручном счете.

Получаемые в результате оптимизации удельные потери напора оказываются значительно большими, чем при использовании проектных стандартных нормативов. В связи с этим для ряда сетей необходимо сооружение насосных подстанций.

Расчеты переменных гидравлических режимов показали, что гидравлическая устойчивость оптимизированных тепловых сетей снижается несущественно.

Комплексный расчет, основанный на оптимизации и анализе гидравлических режимов, позволяет уточнить диаметры по ряду ответвлений, в том числе и тогда, когда необходим учет перспективного расширения

сети. Одновременно с помощью этих расчетов на ЭВМ оценивается наименьшее число подлежащих автоматизации тепловых пунктов, их размещение и диапазон разрегулировки, которому должны удовлетворять характеристики авторегуляторов.

Использование ЭВМ еще более подчеркивает необходимость разработки, обоснования и систематизации технико-экономических нормативов и перспективных экономических показателей, которые можно было бы использовать при проведении массовых расчетов разветвленных сетей на ЭВМ.

Энергетический институт
Сибирского отделения АН СССР,
Иркутск

Поступила в редакцию
25/VI 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные методические положения технико-экономических расчетов в энергетике. ГНТК Совета Министров СССР, М., Металлургиздат, 1959.
2. В. Я. Хасилев, Обобщенные зависимости для технико-экономических расчетов тепловых и других сетей, Теплоэнергетика, № 1, 1957.
3. А. П. Меренков, Применение электронных вычислительных машин для оптимизации разветвленных тепловых сетей, Изв. АН СССР, ОНТ, серия «Энергетика и транспорт», № 4, 1963.

Э. И. ГРИГОЛЮК, В. М. ТОЛКАЧЕВ

К ТЕОРИИ МНОГОСЛОЙНОГО ТЕРМОСТАТА

Широко известна теория изгиба биметаллической полосы при равномерном нагреве, развитая еще Виларсо. Условие наибольшей чувствительности, введенное им, указало на конструктивные особенности термостатов. С. П. Тимошенко [1] рассмотрел проблемы устойчивости полос. Д. Ю. Панов [2] и первый автор настоящей работы [3, 4] развили теорию нелинейного прощелкивания биметаллических термостатов при нагреве и внешней нагрузке.

В работе развита теория многослойных полос. В частности, определены кривизна и напряжения в упругом случае, дается необходимое условие наибольшей чувствительности, приведена задача о размыкании контактов.

Кроме того, рассматривается напряженное состояние для полосы из идеального упруго-пластического материала. Показывается, что результаты работы [5] неверны.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВИЗНЫ И НАПРЯЖЕНИЙ В УПРУГОЙ ЗАДАЧЕ

Будем считать, что полоса состоит из пакета прямолинейных слоев, соединенных жестко по всей поверхности их соприкосновения. Полагаем справедливыми известные гипотезы технической теории балок. Нагрев допустим равномерным, не изменяющим механических характеристик материала. Ось x направим по толщине и будем отсчитывать x от крайнего нижнего волокна пакета, а ось y — вдоль полосы (рис. 1).

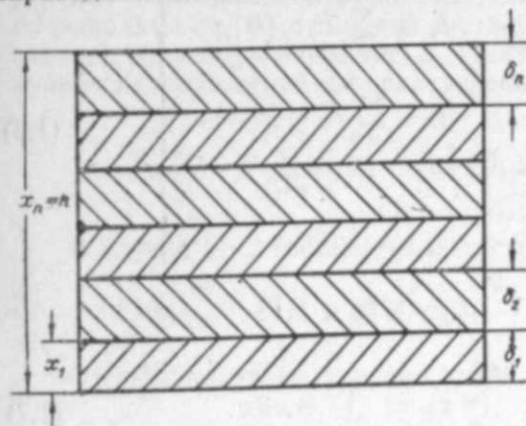


Рис. 1.

Рассмотрим сначала более общую упругую задачу для сплошной полосы с переменным по толщине модулем Юнга $E = E(x)$, коэффициентом линейного температурного расширения $\alpha = \alpha(x)$, температурой $\Theta = \Theta(x)$.

Считая справедливой гипотезу плоских сечений, имеем выражение для продольного напряжения

$$\sigma_y = \sigma = E \left(\varepsilon_0 - \frac{1}{\rho} x \right) - E \alpha \Theta, \quad (1.1)$$

где $\frac{1}{\rho}$ — кривизна,

ε_0 — деформация слоя, соответствующего $x=0$.
Из уравнений равновесия

$$\int_0^h \sigma dx = 0; \quad \int_0^h \sigma x dx = 0 \quad (1.2)$$

получим

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{I_1 I_3 - I_2 I_4}{I_1 I_2 - I_2^2}, \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_0 = -\frac{I_2 I_3 - I_3 I_4}{I_1 I_2 - I_2^2}, \quad (1.4)$$

где

$$I_1 = \int_0^h E dx; \quad I_2 = \int_0^h E x dx; \quad (1.5)$$

$$I_3 = \int_0^h E x^2 dx; \quad I_4 = \int_0^h E x \theta dx; \quad I_5 = \int_0^h E x \theta x dx,$$

h — толщина полосы.

В формулах (1.3) и (1.4) знаменатель положителен при любом распределении $E=E(x)$, это легко показать с помощью неравенства Бунаковского.

Формулы (1.3) и (1.4) справедливы и для многослойной полосы. В этом случае интегралы заменяются суммами

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \sum_{i=1}^n E_i \delta_i; & I_4 &= \sum_{i=1}^n E_i \alpha_i(\theta)_i; \\ I_2 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E_i (x_i^2 - x_{i-1}^2); & I_5 &= \sum_{i=1}^n E_i \alpha_i(\theta x)_i, \\ I_3 &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n E_i (x_i^3 - x_{i-1}^3), \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

где δ_i — толщина слоя,

$$(\theta)_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \theta dx; \quad (\theta x)_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \theta x dx. \quad (1.7)$$

Знаменатель формул (1.3) и (1.4) в этом случае представим в виде

$$I_1 I_2 - I_2^2 = \frac{1}{12} B. \quad (1.8)$$

Здесь

$$B = \sum_{i=1}^n E_i^2 \delta_i^4 + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} E_i E_j \gamma_{ij}; \quad (1.9)$$

$$\gamma_{ij} = \delta_i \delta_j \left[3 \left(2 \sum_{k=1}^{i-1} \delta_k + \delta_i - \delta_j \right)^2 + \delta_i^2 + \delta_j^2 \right]. \quad (1.10)$$

При $\theta = \text{const}$ числитель формулы (1.3) запишем в виде

$$I_1 I_2 - I_2^2 = \frac{\theta}{2} A, \quad (1.11)$$

где

$$A = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} E_i E_j \beta_{ij}; \quad (1.12)$$

$$\beta_{ij} = \delta_i \delta_j \left(2 \sum_{k=1}^{i-1} \delta_k + \delta_i - \delta_j \right) (\alpha_i - \alpha_j). \quad (1.13)$$

С учетом (1.8) и (1.11) формулу (1.3) при $\theta = \text{const}$ запишем в виде

$$\frac{1}{\rho} = -6\theta \frac{A}{B}. \quad (1.14)$$

Напряжения в i -том слое определим по формуле (1.1), подставив вместо E и αE_i и α_j , а также $1/\rho$ и ε_0 из формул (1.14) и (1.4) при $\theta = \text{const}$ или (1.3) и (1.4) в общем случае.

2. АНАЛИЗ КРИВИЗНЫ ПОЛОСЫ

Необходимые условия наибольшей чувствительности полосы или условия максимальной кривизны получим, приравнявая нулю частные производные по E_i от правой части формулы (1.14) (или (1.3) в общем случае), фиксируя, например, E_1 . При этом получим следующую систему кубических уравнений для определения модулей Юнга

$$B \sum_{j=1}^{i-1} E_j \beta_{ij} - A \left(2E_i \delta_i^4 + \sum_{j=1}^{i-1} E_j \gamma_{ij} \right) = 0. \quad (2.1)$$

В случае $n=2$ система (2.1) состоит из одного уравнения

$$(E_1 E_2 \gamma_{21} + E_1^2 \delta_1^4 + E_2^2 \delta_2^4) E_1 \beta_{21} - E_1 E_2 \beta_{21} (2E_2 \delta_2^4 + \gamma_{21} E_1) = 0.$$

Отсюда получаем условие наибольшей чувствительности Виларсо

$$E_1 \delta_1^2 = E_2 \delta_2^2. \quad (2.2)$$

При $n=3$ и больше численное решение системы (2.1) не представляет значительных трудностей, ее решение сводится к разысканию корней полинома степени $(n-1)^2+1$ относительно кривизны. Наибольший корень этого полинома даст искомую кривизну. Действительно, заменяя в (2.1) A/B через $-\frac{1}{6}\theta\rho$, согласно формуле (1.14), сведем систему (2.1) к

линейной относительно E_i . Определяя E_i через ρ и подставляя эти значения в правую часть формулы (1.14), получим упомянутый выше полином.

Через наибольший корень этого полинома находим все E_i по готовым формулам.

3. ЗАДАЧА О РАЗМЫКАНИИ КОНТАКТОВ

В качестве примера применения полученных в § 1 формул рассмотрим следующую задачу (рис. 2).

По заданной центральной силе N и температуре размыкания первого и второго контактов θ_1 и θ_2 (при $\theta_2 < \theta < \theta_1$ контакты разомкнуты) подобрать расстояния a_1 и a_2 . При $\theta_1 = \theta_2 = 0$ полоса не изогнута.

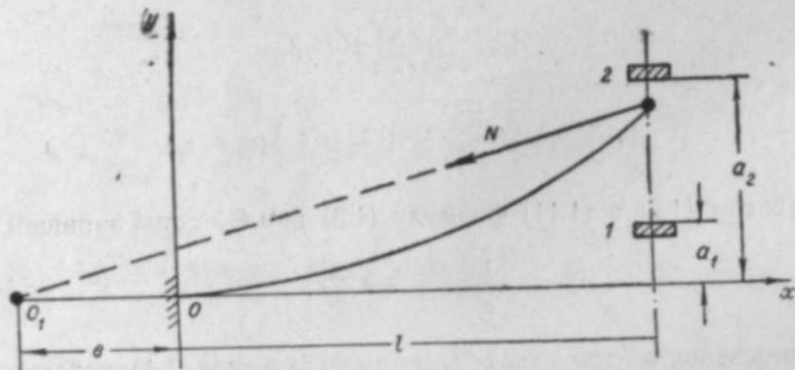


Рис. 2.

Задачу решаем в линейной постановке при следующих граничных условиях:

$$W \Big|_{x=0} = \frac{dW}{dx} \Big|_{x=0} = 0; \quad (3.1)$$

$$W \Big|_{x=l} = \begin{cases} a_1 \\ a_2 \end{cases}; \quad M \Big|_{x=l} = 0,$$

W — прогиб полосы, M — изгибающий момент. Имеем

$$W_{1,2} = c_{1,2} (1 - \cos \lambda x) + \frac{d_{1,2}}{\lambda} (\lambda x - \sin \lambda x); \quad (3.2)$$

$$M_{1,2} = \frac{\theta A}{2I_1} + N \left(\frac{I_2}{I_1} + c_{1,2} \cos \lambda x + \frac{d_{1,2}}{\lambda} \sin \lambda x \right); \quad (3.3)$$

$$\left. \begin{aligned} c_{1,2} &= \frac{-1}{\lambda (\lambda l \cos \lambda l - \sin \lambda l)} \times \\ &\times \left[6 \frac{\theta_{1,2} A + 2I_2 N}{B} (\lambda l - \sin \lambda l) + a_{1,2} \lambda^2 \sin \lambda l \right], \\ d_{1,2} &= \frac{1}{\lambda (\lambda l \cos \lambda l - \sin \lambda l)} \times \\ &\times \left[6 \frac{\theta_{1,2} A + 2I_2 N}{B} (1 - \cos \lambda l) + d_{1,2} \lambda^2 \cos \lambda l \right], \\ \lambda &= 2 \sqrt{\frac{3NI_1}{B}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Постоянные A и B определены формулами (1.9) и (1.12); I_1 ; I_2 — формулами (1.6).

Нижние индексы 1, 2 относятся к положениям 1, 2 контактов (см. рис. 2).

Считая $a_1 > a_2$, запишем условие размыкания контактов

$$M_{1,2}^0 \stackrel{<}{>} N \frac{ba_{1,2}}{b+l}. \quad (3.5)$$

Верхнее неравенство для контакта 2, нижнее — для 1. При этом $M_{1,2}^0$ — моменты в заделке при размыкании контактов 1, 2.

При $\theta = \infty$ формула (3.5) дает следующее равенство для нахождения $a_{1,2}$

$$a_{1,2} = - \left(\frac{I_1 \lambda}{I_2 l} + 6 \theta_{1,2} \frac{A}{B} \right) \frac{1 - \cos \lambda l}{\lambda^2 \cos \lambda l}; \quad (3.6)$$

причем реальным является случай $\lambda < \frac{\pi}{2l}$, что соответствует

$$N < N_{кр} = \frac{\pi^2 B}{48l^2 I_1},$$

где $N_{кр}$ — Эйлера критическая сила потери устойчивости полосы, зашпеченной с одной стороны и свободной с другой.

4. НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ В ПОЛОСЕ ИЗ ИДЕАЛЬНОГО УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрим полосу (см. рис. 1) под воздействием постоянной температуры θ при условии, что в некоторых зонах появляются пластические деформации.

Если считать кривизну положительной, то из формулы (1.1) видно, что пластические деформации растяжения начинают развиваться с ниж-

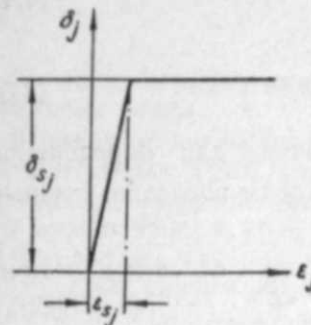


Рис. 3.

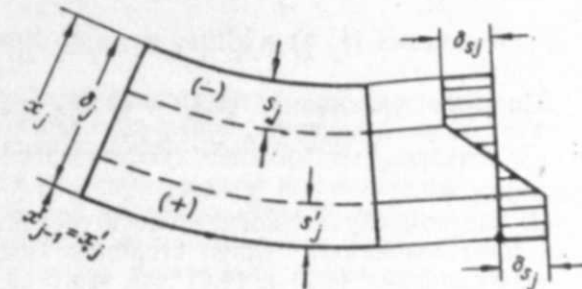


Рис. 4.

ней стороны слоя, деформация сжатия с верхней (рис. 4). Если кривизна и деформация ϵ_0 известны, то напряжения в упругой зоне определяются по формуле (1.1), в пластических зонах они будут равны σ_{sj} или $-\sigma_{sj}$, где σ_{sj} — предел текучести j -го слоя (рис. 3).

Пусть в слоях с номерами $q_1; q_2; \dots; q_k$ ($k \leq n$, n — число всех слоев) развиваются пластические деформации растяжения в зонах толщины

$s_{q_1}, s_{q_2}, \dots, s_{q_k}$, а в слоях с номерами $r_1; r_2; \dots, r_l$ — пластические деформации сжатия в зонах толщины $s_{r_1}; s_{r_2}; \dots, s_{r_l}$.

Условия непрерывности напряжений на границе упругой и пластической сред дают следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \sigma_{sj} &= E_j \left(\varepsilon_0 - \frac{x_j + s_j}{\rho} - \alpha_j \Theta \right); \\ -\sigma_{sj} &= E_j \left(\varepsilon_0 - \frac{x_j - s_j}{\rho} - \alpha_j \Theta \right). \end{aligned} \quad (4.1)$$

С учетом этих соотношений уравнения равновесия (1.2) можно представить в виде

$$\varepsilon_0 I_1 - \frac{1}{\rho} \left(I_2 + \sum_{i=1}^k \frac{E_{qi}}{2} s_{qi}^{12} - \sum_{j=1}^l \frac{E_{rj}}{2} s_{rj}^2 \right) - \Theta I_4 = 0; \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 I_2 - \frac{1}{\rho} \left[I_3 + \sum_{i=1}^k \frac{E_{qi}}{2} s_{qi}^{12} \left(x_{qi}' + \frac{1}{3} s_{qi}' \right) - \right. \\ \left. - \sum_{j=1}^l \frac{E_{rj}}{2} s_{rj}^2 \left(x_{rj} - \frac{1}{3} s_{rj} \right) \right] - \Theta I_5 = 0, \end{aligned} \quad (4.3)$$

где

$$I_3 = \frac{I_6}{\theta}; \quad I_4 = \frac{I_4}{\theta}.$$

При $s_{qi} = s_{rj} = 0$ из системы (4.2) — (4.3) сразу получаем формулы (1.3) и (1.4).

Для удобства расчетов формулы (4.1) перепишем в виде

$$\begin{aligned} s_{qi}' &= -x_{qi}' + \rho(\varepsilon_0 - \beta_{qi}'), \\ s_{rj} &= x_{rj} - \rho(\varepsilon_0 + \beta_{rj}'), \end{aligned} \quad (4.4)$$

где

$$\beta_i' = \varepsilon_{si} + \alpha_i \Theta; \quad \beta_j = \varepsilon_{sj} - \alpha_j \Theta. \quad (4.5)$$

Система уравнений (4.2) — (4.5) достаточна для определения $\varepsilon_0; \frac{1}{\rho}; s_{qi}'; s_{rj}$ и может быть легко решена методом последовательных приближений.

В частном случае, когда полоса состоит из двух слоев и пластические зоны возникают с двух сторон в каждом слое, задача решается точно. Уравнения (4.2) и (4.3) для этого случая имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 I_1 - \frac{1}{\rho} \left[I_2 + \frac{1}{2} E_1 (s_1^{12} - s_1^2) + \frac{1}{2} E_2 (s_2^{12} - s_2^2) - \Theta I_4 \right] = 0, \\ \varepsilon_0 I_2 - \frac{1}{\rho} \left[I_3 - \frac{1}{2} (E_1 \delta_1 s_1^{12} + E_2 \delta_2 s_2^{12}) + \frac{1}{6} E_1 (s_1^{13} + s_1^3) + \right. \\ \left. + \frac{1}{6} E_2 (s_2^{13} + s_2^3) \right] - \Theta I_5 = 0. \end{aligned} \quad (4.6)$$

После подстановки $s_1; s_2; s_1'; s_2'$ из (4.4) систему (4.6) приведем к виду

$$A_1 \rho - B_1 = 0; \quad A_2 \rho^3 - B_2 \rho = 0, \quad (4.7)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= 2 [\varepsilon_0 (\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) - \Theta (\sigma_{s1} \alpha_1 + \sigma_{s2} \alpha_2)]; \\ A_2 &= 2\varepsilon_0^2 (\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) - 4\varepsilon_0 \Theta (\sigma_{s1} \alpha_1 + \sigma_{s2} \alpha_2) + 2\sigma_{s1} \left(\frac{1}{3} \varepsilon_{s1}^2 + \alpha_1^2 \Theta^2 \right) + \\ &+ 2\sigma_{s2} \left(\frac{1}{3} \varepsilon_{s2}^2 + \alpha_2^2 \Theta^2 \right); \\ B_1 &= \sigma_{s2} \delta_2 + \sigma_{s1} \delta_1; \\ B_2 &= \sigma_{s1} \delta_1^2 + \sigma_{s2} \delta_2^2. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Система (4.7) дает квадратное уравнение для определения ε_0

$$A_2 B_1^2 - A_1^2 B_2 = 0. \quad (4.9)$$

Оно имеет 2 действительных корня

$$\varepsilon_0 = \Theta \frac{\sigma_{s1} \alpha_1 + \sigma_{s2} \alpha_2}{\sigma_{s1} + \sigma_{s2}} \pm \frac{\sigma_{s2} \delta_2 - \sigma_{s1} \delta_1}{\sigma_{s1} + \sigma_{s2}} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (4.10)$$

где

$$\begin{aligned} m &= 2 (\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) (\sigma_{s1} \delta_1^2 + \sigma_{s2} \delta_2^2) - (\sigma_{s1} \delta_1 + \sigma_{s2} \delta_2)^2; \\ k &= \Theta^2 \sigma_{s1} \sigma_{s2} (\alpha_2 - \alpha_1)^2 + \frac{1}{3} (\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) (\sigma_{s1} \varepsilon_{s1}^2 + \sigma_{s2} \varepsilon_{s2}^2). \end{aligned} \quad (4.11)$$

Второе уравнение (4.7) с учетом (4.10) дает

$$\rho = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (4.12)$$

Согласно первому уравнению (4.7), в (4.10) и (4.11) следует брать одинаковые знаки.

В предположении, что в процессе охлаждения полосы материал подчиняется закону Гука, определение остаточной кривизны, остаточных напряжений и деформаций не представляет никаких затруднений. Для этого нужно решить упруго-пластическую задачу и фиктивную термоупругую задачу, т. е. задачу при той же температуре Θ , что и в упруго-пластическом случае, но считая справедливым закон Гука. Согласно общим теоремам теорий пластичности, остаточные напряжения, деформации и кривизну получим как разность упруго-пластического и фиктивного термоупругого решения.

Таким образом, имеем

$$\sigma^0 = \sigma - \sigma'; \quad \varepsilon^0 = \varepsilon - \varepsilon'; \quad \frac{1}{\rho^0} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^0}. \quad (4.13)$$

Здесь $\sigma^0; \varepsilon^0; \frac{1}{\rho^0}$ — остаточные напряжения, деформации и кривизна;

$\sigma; \epsilon; \frac{1}{\rho}$ — напряжения, деформации и кривизна, полученные решением упруго-пластической задачи;
 $\sigma^t; \epsilon^t; \frac{1}{\rho^t}$ — те же величины, полученные решением фиктивной термоупругой задачи.

В заключение отметим, что частный случай рассмотренной задачи, когда полоса состоит из двух слоев, рассматривался в работе [5].

Уравнения, приведенные в этой статье, решены в предположении, что толщины пластических зон s_{q_i} и s_{r_j} малы по сравнению с толщиной соответствующего слоя. Вследствие этого авторы отбрасывали вторые и третьи степени s_{q_i} и s_{r_j} .

Из уравнений (4.2) и (4.3) нашей работы следует, что в этом случае имеют место упругие деформации, вследствие чего цель авторов работы [5] не достигнута — пластическое поведение полосы рассмотреть им не удалось.

Новосибирск

Поступила в редакцию
8/IV 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. S. P. Timoshenko. Analysis of Bimetal Thermostat. I—1 of the Optical Society of America and Review of the Scientific Instruments, 1925, Vol. 11, No. 3, pp. 233—255.
2. Д. Ю. Панов, Об устойчивости биметаллической оболочки при нагреве (к теории теплового выключателя). ПММ, 1947, т. XI, вып. 6, стр. 603—610.
3. Э. И. Григолюк, О равновесии и устойчивости биметаллических полос. Инж. сборник, т. VII, 1950, стр. 69—90.
4. Э. И. Григолюк, Теория тонких биметаллических оболочек и пластин. Инж. сб., т. XVII, 1953.
5. O. Mahrenholtz, Johnson. On Bimetal Thermostats. Int. J. Mech. Sci., Pergamon Press LTD. 1962, Vol. 4, pp. 35—52.

А. С. АНИСИМОВ

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В СЛЕДЯЩИХ ПРИВОДАХ С АСИНХРОННЫМ ДВУХФАЗНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Асинхронные двухфазные микродвигатели являются в настоящее время самыми распространенными исполнительными двигателями переменного тока. Широкое применение этих двигателей в системах автоматического регулирования, управления, измерительной техники ставит задачу создания микроэлектроприводов, отвечающих высоким требованиям, предъявляемым к их динамическим характеристикам и, в частном случае, к их быстродействию. Таким образом, возникает задача об оптимальном управлении микроэлектроприводами.

В настоящее время в литературе вопросам оптимального управления отводится много места. Однако вопросы синтеза оптимального управления микроэлектроприводами остаются еще пока не решенными. Это объясняется тем, что большинство работ посвящено вопросам теории, непосредственное же применение полученных выражений к микроприводам встречает большие трудности, а в некоторых случаях и совершенно невозможно, так как приводимые выражения бывают громоздкими и не учитывают особенностей частных систем приводов. К тому же имеющиеся работы по синтезу оптимальных управлений в электроприводах не охватывают всех вопросов оптимального управления электроприводами [1, 2].

В настоящей статье ставится цель дать конкретные выражения для оптимальных (в смысле быстродействия) управлений микроэлектроприводами, которые позволили бы производить расчет и проектирование систем управления микроприводами в каждом конкретном случае непосредственно, без проведения дополнительных вычислений.

1. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Будем считать, что время протекания переходных электромагнитных процессов в микроэлектроприводе с асинхронным двухфазным двигателем незначительно по сравнению с длительностью механических переходных процессов и быстродействие привода определяется быстродействием последних.

Учитывая это, запишем уравнение движения микропривода в виде

$$J \frac{d\Omega}{dt} + M_c = M_d, \quad (1)$$

где J — момент инерции ротора двигателя и нагрузки, приведенный к валу двигателя;

M_c — момент сопротивления нагрузки, приведенный к валу двигателя;

M_x — момент, развиваемый двигателем на валу;
 Ω — угловая скорость вращения двигателя.

Принимая наклон механических характеристик двигателя, снятых при постоянном напряжении на обмотке возбуждения $U_x = \text{const}$ и различных напряжениях на управляющей обмотке U_y постоянным, что при работе двигателя в области рабочих скоростей (50–60% синхронной скорости) вносит незначительные погрешности, и учитывая пропорциональность пусковых моментов двигателя соответствующим им управляющим напряжениям, что также близко соответствует реальным механическим характеристикам, можем написать выражение для момента двигателя в виде

$$M_x = kU_y - \beta\Omega, \quad (2)$$

где k — коэффициент пропорциональности между пусковым моментом двигателя M_n и U_y ;

β — жесткость механической характеристики двигателя.
 Подставляя выражение (2) в (1), получаем

$$J \frac{d\Omega}{dt} + \beta\Omega + M_c = kU_y.$$

В случае наличия в системе вязкого трения имеем

$$J \frac{d\Omega}{dt} + F\Omega + M_c = kU_y,$$

где $F = \beta + \beta'$, а β' — коэффициент вязкого трения.

Угловая скорость вращения двигателя $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$, где θ — угол поворота вала двигателя.

Тогда возмущенное движение электропривода описывается системой двух дифференциальных уравнений

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega, \quad \frac{d\Omega}{dt} = -\frac{F}{J}\Omega - \frac{M_c}{Jk} + \frac{k}{Jk} U_y. \quad (3)$$

Заметим, что момент нагрузки на валу двигателя M_c меняет свой знак в зависимости от направления скорости вращения двигателя (или механизма), т. е. $M_c = M_c \text{sign } \Omega$.

В случае, если M_c пропорционален скорости вращения двигателя $M_c = \alpha\Omega$, система уравнений (3) принимает вид:

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega, \quad \frac{d\Omega}{dt} = -\frac{L}{J}\Omega + \frac{k}{J} U_y, \quad (4)$$

где $L = F + \alpha$.

Если статический момент двигателя мал по сравнению с инерционной нагрузкой и им можно пренебречь, тогда получим

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega, \quad \frac{d\Omega}{dt} = -\frac{F}{J}\Omega + \frac{k}{J} U_y. \quad (5)$$

Ограничимся рассмотрением приведенных трех случаев.

В заключение отметим, что величина управляющего напряжения

U_y в реальных системах не может превосходить своего предельного значения U_{yn} , т. е.

$$U_y < U_{yn}, \quad (6)$$

а угол сдвига фаз между напряжениями U_y и U_n при амплитудном управлении может принимать два значения $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сформулируем задачу оптимального управления электроприводами в следующем виде: найти управление U_y , удовлетворяющее условию (6), которое переводит систему (3), (4) или (5) в положение равновесия из какого-либо начального состояния за кратчайшее время. Таким образом, имеем вариационную задачу, в которой необходимо получить управление минимизирующее функционал, вида

$$\int_{t_1}^{t_2} dt.$$

Решение поставленной задачи осуществим с использованием принципа максимума [3].

3. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ВХОДНОМ СТУПЕНЧАТОМ ВОЗДЕЙСТВИИ g

Введем новую систему координат:

$$x_1 = g - \theta; \quad x_2 = \frac{dx_1}{dt} = -\Omega. \quad (7)$$

В новой системе координат управления (3) примут вид:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \quad \frac{dx_2}{dt} = -\frac{F}{J}x_2 - \frac{k}{J}U_y + \frac{M_c}{J}. \quad (8)$$

Составим функцию $H(x, \psi, U_y)$:

$$H(x, \psi, U_y) = \psi_1 x_2 - \psi_2 \frac{F}{J} x_2 - \psi_2 \frac{kU_y}{J} + \psi_2 \frac{M_c}{J}. \quad (9)$$

Запишем систему уравнений вспомогательных переменных ψ_1 и ψ_2 , сопряженную системе (8)

$$\frac{d\psi_1}{dt} = 0, \quad \frac{d\psi_2}{dt} = -\psi_1 + \psi_2 \frac{F}{J}. \quad (10)$$

Эта система уравнений непосредственно интегрируется:

$$\psi_1 = c_1 = \text{const}, \quad \psi_2 = \frac{J}{F} c_1 + c_2 e^{\frac{F}{J}t}. \quad (11)$$

Согласно принципу максимума, функция H при оптимальном управлении должна принимать максимальное значение в любой момент времени.

Функция $\Psi_2(t)$ при значениях коэффициентов c_1 и c_2 , не тождественно равных нулю или отличных от нуля, не равна нулю и меняет свой знак не более одного раза за время управления. Следовательно, оптимальное управление U_y имеет не более двух интервалов, на каждом из которых поддерживается его предельное значение U_{yn} , и меняет свою фазу на обратную при переходе от одного интервала к другому. Поэтому, в общем случае, фазовые траектории перехода систем с какого-либо первоначального состояния в начало координат ($x_1=0; x_2=0$) будут состоять не более чем из двух участков. Причем все оптимальные фазовые траектории системы, движущейся в начало координат, имеют своими конечными участками две кривые, выходящие из начала координат и соответствующие значениям угла сдвига фаз $\varphi = +\frac{\pi}{2}$ и $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ при $U_y = U_{yn}$. Предпоследние участки фазовых траекторий соответствуют управлению с фазой, обратной фазе конечного участка, из которого они выходят. Таким образом, два конечных участка фазовых траекторий разбивают фазовую плоскость на две части, в одной из которых поддерживается $\varphi = +\frac{\pi}{2}$, в другой $\varphi = -\frac{\pi}{2}$, и служат линией переключения.

Уравнение конечных участков может быть найдено, если положить в уравнениях (8) время t равным $-t$, т. е. решать уравнения в обратном направлении. Тогда выражение для этих участков может быть найдено в виде $\Psi = x_1 + f(x_2)$ и в области $\Psi > 0$ получим $\varphi = +\frac{\pi}{2}$, а в области $\Psi < 0$ — $\varphi = -\frac{\pi}{2}$.

Решая уравнения (8) в обратном направлении и исключая время t , получаем выражение переключающей функции:

$$\Psi = x_1 - \frac{J(kU_{yn} - M_c)}{F^2} \operatorname{sign} x_2 \ln \left(1 + \frac{|x_2|}{\frac{kU_{yn} - M_c}{F}} \right) + \frac{J}{F} x_2. \quad (12)$$

Тогда оптимальное управление имеет вид:

$$U_y = U_{yn} \sin \left[\omega t + \frac{\pi}{2} \operatorname{sign} \Psi \right], \quad (13)$$

где ω — угловая частота питающего напряжения.

В случае, когда $M_c = \alpha\Omega$, выражение переключающей функции принимает вид:

$$\Psi = x_1 - \frac{JkU_{yn}}{L^2} \operatorname{sign} x_2 \ln \left(1 + \frac{|x_2|}{\frac{kU_{yn}}{L}} \right) + \frac{J}{L} x_2. \quad (14)$$

а при $M_c = 0$

$$\Psi = x_1 + \frac{JkU_{yn}}{k_p F^2} \operatorname{sign} x_2 \ln \left(1 + \frac{|x_2|}{\frac{kU_{yn}}{k_p F}} \right) + \frac{J}{F} x_2. \quad (15)$$

4. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ВХОДНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ gt

Введем новую систему координат:

$$x_1 = gt - \Theta; \quad x_2 = \frac{dx_1}{dt} = g - \Omega. \quad (16)$$

Тогда уравнения (3) в новой системе координат примут вид:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \quad \frac{dx_2}{dt} = -\frac{F}{J} x_2 + \frac{F}{J} g - \frac{k}{J} U_y + \frac{M_c}{J}. \quad (17)$$

Составим функцию $H(x; \psi; U_y)$.

$$H(x; \psi, U_y) = \psi_1 x_2 - \psi_2 \frac{F}{J} x_2 + \psi_2 \frac{F}{J} g - \psi_2 \frac{k}{J} U_y + \psi_2 \frac{M_c}{J}. \quad (18)$$

Очевидно, что система уравнений вспомогательных переменных ψ_1 и ψ_2 останется прежней и, следовательно, функция $\psi_2(t)$ меняет свой знак не более одного раза за время управления. Производя рассуждения, аналогичные предыдущим, найдем, что оптимальное управление и в этом случае определяется выражением (13), а переключающая функция Ψ имеет вид:

$$\Psi = x_1 + \frac{J}{F} \left[g - \frac{kU_{yn} - M_c}{F} \operatorname{sign} x_2 \right] \times \\ \times \ln \left(1 - \frac{x_2}{g + \frac{kU_{yn} - M_c}{F} \operatorname{sign} x_2} \right) + \frac{J}{F} x_2. \quad (19)$$

В случае, когда $M_c = \alpha\Omega$, выражение переключающей функции принимает вид:

$$\Psi = x_1 + \frac{J}{L} \left[g - \frac{kU_{yn}}{L} \operatorname{sign} x_2 \right] \ln \left(1 - \frac{x_2}{g + \frac{kU_{yn}}{L} \operatorname{sign} x_2} \right) + \frac{J}{L} x_2, \quad (20)$$

а при $M_c = 0$

$$\Psi = x_1 + \frac{J}{F} \left[g - \frac{kU_{yn}}{F} \operatorname{sign} x_2 \right] \ln \left(1 - \frac{x_2}{g + \frac{kU_{yn}}{F} \operatorname{sign} x_2} \right) + \frac{J}{F} x_2. \quad (21)$$

5. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ВХОДНОЙ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ $g \sin \omega t$

Введем новую систему координат:

$$x_1 = g \sin \omega t - \Theta; \quad x_2 = \frac{dx_1}{dt} = g \omega \cos \omega t - \Omega, \quad (22)$$

тогда уравнения (3) в новой системе координат примут вид:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2,$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\frac{F}{J}x_2 + \frac{F}{J}g\omega \cos \omega t - g\omega^2 \sin \omega t - \frac{k}{J}U_y + \frac{M_c}{J}. \quad (23)$$

Составим функцию $H(x, \psi, U_y)$:

$$H(x, \psi, U_y) = \psi_1 x_2 - \psi_2 \frac{F}{J}x_2 + \psi_2 \frac{F}{J}g\omega \cos \omega t - \psi_2 g\omega^2 \sin \omega t - \psi_2 \frac{k}{J}U_y + \psi_2 \frac{M_c}{J}. \quad (24)$$

Очевидно, что и в этом случае система уравнений вспомогательных переменных ψ_1 и ψ_2 имеет вид (10) и оптимальное управление определяется выражением (13).

Выражение для переключающей функции Ψ находим при решении уравнений (23) в обратном направлении:

$$\Psi = x_1 - \frac{J(kU_{yn} - M_c)}{k_p F^2} \text{sign } x_2 \ln \left(\frac{g\omega \cos \omega t - \frac{kU_{yn} - M_c}{F} \text{sign } x_2 - x_2}{g\omega - \frac{kU_{yn} + M_c}{F} \text{sign } x_2} \right) + \frac{J}{F}x_2 - \frac{J}{F}g\omega \cos \omega t + \frac{J}{F}g\omega - g \sin \omega t. \quad (25)$$

Учитывая, что $x_b = g \sin \omega t$, и обозначая $x_{b2} = \frac{dx_b}{dt} = g\omega \cos \omega t$ и $x_{b2m} = g\omega$, перепишем выражение (25) в более удобном для реализации виде

$$\Psi = x_1 - \frac{J(kU_{yn} - M_c)}{k_p F^2} \text{sign } x_2 \ln \left(\frac{x_{b2} - \frac{kU_{yn} - M_c}{F} \text{sign } x_2 - x_2}{x_{b2m} - \frac{kU_{yn} - M_c}{F} \text{sign } x_2} \right) + \frac{J}{F}x_2 - \frac{J}{F}x_{b2} + \frac{J}{F}x_{b2m} - x_b. \quad (26)$$

В случае $M_c = \alpha\Omega$ выражение переключающей функции принимает вид:

$$\Psi = x_1 - \frac{JkU_{yn}}{L^2} \text{sign } x_2 \ln \left(\frac{x_{b2} - \frac{kU_{yn}}{L} \text{sign } x_2 - x_2}{x_{b2m} - \frac{kU_{yn}}{L} \text{sign } x_2} \right) + \frac{J}{L}x_2 - \frac{J}{L}x_{b2} + \frac{J}{L}x_{b2m} - x_b, \quad (27)$$

а при $M_c = 0$ получаем:

$$\Psi = x_1 + \frac{JkU_{yn}}{F^2} \text{sign } x_2 \ln \left(\frac{x_{b2} - \frac{kU_{yn}}{F} \text{sign } x_2 - x_2}{x_{b2m} - \frac{kU_{yn}}{F} \text{sign } x_2} \right) + \frac{J}{F}x_2 - \frac{J}{F}x_{b2} + \frac{J}{F}x_{b2m} - x_b. \quad (28)$$

Отметим, что в случае входной ступенчатой функции g выражение переключающей функции не зависит от параметров входного воздействия, а в случае входной линейной функции gt или входной гармонической функции $g \sin \omega t$ — зависит.

Область применения полученных выражений переключающей функции не ограничивается электроприводами с асинхронным двухфазным двигателем. Например, эти выражения без изменений могут быть использованы и в случае электроприводов постоянного тока с двигателями постоянного (независимого) возбуждения, при управлении ими посредством изменения напряжения на якорной обмотке двигателя.

ВЫВОДЫ

1. Реализация полученных выражений переключающей функции для типовых входных воздействий позволяет осуществить в системе оптимальный по быстродействию переходной процесс.

2. Применение полученных выражений для проектирования реальных систем не требует дополнительных расчетов или снятия дополнительных характеристик, так как все величины, входящие в эти выражения, являются известными или определяются перед началом расчета любой реальной системы.

Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
30/1 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Лернер, Принципы построения быстродействующих следящих систем и регуляторов, М.—Л., ГЭИ, 1961.
2. А. Е. Бор-Раменский, Сун Цзянь, Оптимальный следящий привод с двумя параметрами управления, А и Т, т. XXII, № 2, 1961.
3. Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко, Математическая теория оптимальных процессов, М., Физматгиз, 1961.

О. Л. БАНДМАН

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ RC-СХЕМ

В настоящее время существует целый ряд методов синтеза электрических RC-схем [1, 2, 3]. Все они основаны на одном и том же принципе: заданная частотная функция при помощи ряда последовательных преобразований приводится к такому виду, для которого методами анализа уже подобрана соответствующая схема. В результате каждый метод пригоден только для функций определенного типа, а полученная схема во многих случаях содержит большое количество элементов.

Разработанные в последние годы методы анализа [4, 5, 6], основанные на использовании обобщенных матричных параметров, открывают новые возможности для синтеза электрических схем. Матрицы проводимости и сопротивления являются такими характеристиками схемы, которые в едином математическом выражении полностью определяют и конфигурацию схемы и параметры ее элементов. Поэтому использование матрицы в качестве промежуточного звена при переходе от заданной функции к реализующей схеме расширяет возможности выбора наиболее удачных и простых структур. Кроме того, поскольку обобщенными параметрами могут характеризоваться схемы с элементами самого различного типа, включая полупроводниковые приборы и электронные лампы, методы синтеза, основанные на их применении, могут быть распространены и на активные схемы.

Предлагаемый в настоящей статье метод определения матрицы схемы и ее параметров применим для реализации входных [7] и передаточных функций. Статья посвящается реализации коэффициентов передачи четырехполусников RC. Все результаты при помощи известных преобразований могут быть перенесены и на другие схемы с элементами двух типов (RL, LC).

СВЯЗЬ ФУНКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ С ЭЛЕМЕНТАМИ МАТРИЦЫ Y

Матрица проводимости RC-схемы представляет собой линейный матричный двучлен относительно комплексной частоты p

$$Y = pC + G, \quad (1)$$

где C и G — матрицы проводимости схем, составленных из элементов только одного типа и удовлетворяющих условиям их физической осуществимости [8].

Определителем матрицы Y является полином вида

$$\Delta = b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0 = \sum_{q=0}^m b_q p^q, \quad (2)$$

степень которого равна рангу матрицы C , корни вещественны и отрицательны, кратность нулевого корня равна дефекту матрицы G [9]. Этими же свойствами обладают главные миноры матрицы Y , поскольку их можно рассматривать как определители матриц схем, у которых закорочены узловые пары, соответствующие вычеркнутым строкам и столбцам. Корни двух последовательных главных миноров находятся в следующем соотношении:

$$|\sigma_1| \leq |\sigma'_1| \leq |\sigma_2| \leq \dots \leq |\sigma_{n-1}| \leq |\sigma_n|, \quad (3)$$

где $\sigma_1 \dots \sigma_n$ и $\sigma'_1 \dots \sigma'_n$ — корни главных миноров высшего и низшего порядков соответственно.

Если при составлении матрицы проводимости выбрать первую узловую пару, совпадающую с входными зажимами, а последнюю (n -ную) — с выходными, то коэффициент передачи выразится через миноры Y следующим образом [4]:

$$K = \frac{U_n}{U_1} = \frac{\Delta \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n-1 \\ 2 & 3 & \dots & n \end{pmatrix}}{\Delta \begin{pmatrix} 2 & 3 & \dots & n \\ 2 & 3 & \dots & n \end{pmatrix}} = \frac{\sum_{q=0}^n f_q p^q}{\sum_{q=0}^n a_q p^q}, \quad (4)$$

где $\Delta \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n-1 \\ 2 & 3 & \dots & n \end{pmatrix}$ и $\Delta \begin{pmatrix} 2 & 3 & \dots & n \\ 2 & 3 & \dots & n \end{pmatrix}$ — миноры матрицы Y , построенные на пересечении строк и столбцов, номера которых указаны в верхней и нижней строках скобки соответственно.

Применим к матрице $Y = pC + G$ формулу разложения определителя суммы двух матриц [4]

$$\Delta = \det(pC + G) = \sum_{q=0}^n \sum_{1 < i_j, k_j < n} (-1)^\delta \Delta_{pC} \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \dots & i_q \\ k_1 & k_2 & \dots & k_q \end{pmatrix} \Delta_G \begin{pmatrix} i_{q+1} & \dots & i_n \\ k_{q+1} & \dots & k_n \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где

$$\delta = \sum_{j=1}^q i_j + \sum_{j=1}^q k_j.$$

Приведем формулу (5) к виду полинома относительно p . Поскольку в матрице pC каждый элемент имеет множитель p , то любой минор q -го порядка этой матрицы будет умножен на p^q . Вынесем этот множитель за знак первой суммы

$$\Delta = \sum_{q=0}^n p^q \sum_{1 < i_j, k_j < n} (-1)^\delta \Delta_C \begin{pmatrix} i_1 & \dots & i_q \\ k_1 & \dots & k_q \end{pmatrix} \Delta_G \begin{pmatrix} i_{q+1} & \dots & i_n \\ k_{q+1} & \dots & k_n \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Если матрицы C и G особенные, $r_C < n$, $d > 0$, то в формуле (6) все коэффициенты при степенях p выше r_C и ниже d будут равны нулю и выражение (6) запишется в виде

$$\Delta = \sum_{q=d}^{r_C} p^q \sum_{1 < i_j, k_j < n} \Delta_C \begin{pmatrix} i_1 & \dots & i_q \\ k_1 & \dots & k_q \end{pmatrix} \Delta_G \begin{pmatrix} i_{q+1} & \dots & i_n \\ k_{q+1} & \dots & k_n \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Сравнивая формулу (7) с (2), можно определить коэффициенты полинома Δ следующим образом:

$$b_q = \sum_{1 < i_j, k_j < n} (-1)^s \Delta_C \begin{pmatrix} i_1 \dots i_q \\ k_1 \dots k_q \end{pmatrix} \Delta_G \begin{pmatrix} i_{q+1} \dots i_n \\ k_{q+1} \dots k_n \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Для коэффициентов полиномов, равных минорам матрицы Y , получены аналогичные выражения. Пусть

$$\Delta \begin{pmatrix} 2 \dots n \\ 2 \dots n \end{pmatrix} = \sum_{q=0}^l a_q p^q, \quad (9)$$

$$\Delta \begin{pmatrix} 1 \dots n-1 \\ 2 \dots n \end{pmatrix} = \sum_{q=0}^h f_q p^q, \quad (10)$$

$$\Delta \begin{pmatrix} 2 \dots n-1 \\ 2 \dots n-1 \end{pmatrix} = \sum_{q=0}^h e_q p^q. \quad (11)$$

Тогда

$$a_q = \sum_{2 < i_j, k_j < n} (-1)^s \Delta_C \begin{pmatrix} i_1 \dots i_q \\ k_1 \dots k_q \end{pmatrix} \Delta_G \begin{pmatrix} i_{q+1} \dots i_{n-1} \\ k_{q+1} \dots k_{n-1} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$f_q = \sum_{\substack{1 < i_j < n-1 \\ 2 < k_j < n}} (-1)^s \Delta_C \begin{pmatrix} i_1 \dots i_q \\ k_1 \dots k_q \end{pmatrix} \Delta_G \begin{pmatrix} i_{q+1} \dots i_{n-1} \\ k_{q+1} \dots k_{n-1} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$e_q = \sum_{2 < i_j, k_j < n-1} (-1)^s \Delta_C \begin{pmatrix} i_1 \dots i_q \\ k_1 \dots k_q \end{pmatrix} \Delta_G \begin{pmatrix} i_{q+1} \dots i_{n-2} \\ k_{q+1} \dots k_{n-2} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ПРОСТЫМИ СТРУКТУРАМИ

Процесс реализации заданной функции разделим на два этапа: а) выбор конфигурации схемы четырехполюсника; б) определение параметров этой схемы путем решения системы уравнений, составленной из выражений (12—14) для всех коэффициентов полиномов заданной функции.

Естественно, что при выборе конфигурации схемы следует стремиться к тому, чтобы число ее элементов оказалось минимальным. Будем называть схемами с минимальным числом элементов такие схемы, которые имеют минимально возможное число узлов, причем элементы каждого типа не образуют ни одного замкнутого контура. Как известно, число узлов схемы на единицу больше порядка ее матрицы Y , который, в свою очередь, не может быть меньше рангов матриц C и G [7].

Пусть задана функция K в виде выражения (4). Поскольку $h \leq l$, наименьшие возможные ранги миноров $(n-1)$ -го порядка матриц C и G

определяются величиной l , то есть $r_{C \min} = l$, $r_{G \min} = l$ и, следовательно, наименьший порядок матрицы Y и число узлов будут соответственно равны $n_{\min} = l + 1$, $v_{\min} = l + 2$. Так как наименьшее число элементов схемы равно рангу ее матрицы [4], то естественно предположить, что минимальное число элементов каждого типа равно l . Однако в этом случае $\Delta_C \begin{pmatrix} 1 \dots n-1 \\ 2 \dots n \end{pmatrix} = \Delta \begin{pmatrix} 2 \dots n \\ 2 \dots n \end{pmatrix} = c_1 c_2 \dots c_l$ и $\Delta_G \begin{pmatrix} 1 \dots n-1 \\ 2 \dots n \end{pmatrix} = \Delta_G \begin{pmatrix} 2 \dots n \\ 2 \dots n \end{pmatrix} = g_1 g_2 \dots g_l$, что возможно только при равенстве коэффициентов $a_l = f_l$ и $a_0 = f_0$. Если же в заданной функции $a_l \neq f_l$ и $a_0 \neq f_0$, то число необходимых элементов каждого типа увеличится на единицу.

Выбор конфигурации схемы, реализующей заданную функцию, следует производить в соответствии со свойствами функции K для различных структур [9]. Чтобы облегчить эту задачу, можно, основываясь на этих свойствах, для функций некоторых простых структур получить условия их физической осуществимости в виде соотношений между коэффициентами полиномов числителя и знаменателя. Отнесем к числу таких простых структур схемы с минимальным числом элементов, реализующие функции K с полиномами первой и второй степени в знаменателе. В таблице приведены эти условия для некоторых наиболее употребительных простых структур.

Если заданная функция удовлетворяет одному из условий таблицы, то процедура ее реализации состоит только в определении параметров соответствующей ей схемы, что сводится к следующим операциям:

- выбирается система координат и составляются матрицы C и G ;
- для каждого коэффициента полиномов числителя и знаменателя составляются выражения (12) и (13), образующие систему уравнений относительно неизвестных параметров элементов схемы;
- решается система уравнений, и этим определяются параметры схемы.

Пример 1. Функцию

$$K = \frac{p^2 + 2p + 2}{3p^2 + 9p + 5}$$

реализовать RC-схемой. Функция удовлетворяет условию

$$a_1 > a_2 \frac{f_1}{f_2} + a_0 \frac{f_2}{f_1},$$

следовательно, реализуема схемой 6 таблицы (рис. 1). Матрицы C и G и система уравнений (12) и (13) имеют вид:

$$C = \begin{array}{|c|c|c|} \hline c_2 & & -c_2 \\ \hline & c_1 & \\ \hline -c_2 & & c_2 + c_3 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{aligned} c_1 c_2 &= 1 \\ c_2 (g_1 + g_2) &= 2 \\ g_1 g_2 &= 2 \\ c_1 (c_2 + c_3) &= 3 \\ c_1 (g_2 + g_3) + (c_2 + c_3) (g_1 + g_2) &= 9 \\ g_1 (g_2 + g_3) + g_2 g_3 &= 5 \end{aligned}$$

$$G = \begin{array}{|c|c|c|} \hline g_1 & -g_1 & \\ \hline -g_1 & g_1 + g_2 & -g_2 \\ \hline & -g_2 & g_2 + g_3 \\ \hline \end{array}$$

Условия физической осуществимости коэффициента передачи простыми структурами

№№ п/п	Функция К	Схема	Условия	Примечания
1	$\frac{pf_1 + f_0}{pa_1 + a_0}$		$f_1 < a_1; f_0 \leq a_0$	при $f_0 = a_0, g_2 = 0$ при $f_1 = a_1, c_2 = 0$
2	$\frac{pf_1 + f_0}{a_2p^2 + a_1p + a_0}$		$f_1 < a_1; f_0 < a_0$ $a_1 - f_1 < \frac{a_2 a_0}{f_1}$	при $a_0 = f_0, g_2 = 0$
3	$\frac{f_2p^2 + f_1p}{a_2p^2 + a_1p + a_0}$		$f_2 \leq a_2; f_1 \leq a_1$ $(a_1 - f_1)^2 > 4a_0(a_2 - f_2)$	при $f_2 = a_2, c_3 = 0$
4	$\frac{f_1p + f_0}{a_2p^2 + a_1p + a_0}$		$f_1 < a_1; f_0 < a_0$ $a_1 > a_2 \frac{a_1 - f_1}{a_0 - f_0} + a_0 \frac{a_0 - f_0}{a_1 - f_1}$	
5	$\frac{f_2p^2 + f_1p}{a_2p^2 + a_1p + a_0}$		$f_2 < a_2; f_1 < a_1$ $a_1 > a_2 \frac{f_1}{f_2} + a_0 \frac{f_2}{f_1}$	

6	$\frac{f_2p^2 + f_1p + f_0}{a_2p^2 + a_1p + a_0}$		$f_2 < a_2; f_1 < a_1; f_0 \leq a_0$ $a_1 > a_2 \frac{f_1}{f_2} + a_0 \frac{f_2}{f_1}$	при $f_2 = a_2, c_3 = 0$ при $f_0 = a_0, g_3 = 0$
7	$\frac{f_1p - f_0}{a_1p + a_0}$		$f_1 < a_1; f_0 < a_0$	
8	$\frac{f_1p - f_0}{a_2p^2 + a_1p + a_0}$		$f_1 < a_1; f_0 \leq a_0$ $a_1 - f_1 > \frac{f_1}{a_0 - f_0} f_0 + \frac{a_0 - f_0}{f_1} a_2$	
9	$\frac{f_2p^2 - f_0}{a_2p^2 + a_1p + a_0}$		$f_2 \leq a_2; f_1 \leq a_1; f_0 \leq a_0$	при $f_2 = a_2, c_3 = 0$ при $f_0 = a_0, g_3 = 0$
10	$\frac{f_2p^2 \pm f_1p + f_0}{a_2p^2 + a_1p + a_0}$		$f_2 < a_2; f_1 \leq a_1; f_2 < a_0$ $a_1 \mp f_1 < \frac{2 a_2 a_0 + (a_2 - f_2)(a_0 - f_0) }{a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2 a_0}}$	

Решив эти уравнения, получим неизвестные параметры схемы:

$$g_1 = 2 \frac{1}{\text{ом}}; g_2 = 1 \frac{1}{\text{ом}}; g_3 = 1 \frac{1}{\text{ом}}; c_1 = \frac{3}{2} \phi; c_2 = \frac{2}{3} \phi; c_3 = \frac{4}{3} \phi.$$



Рис. 1.

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ЛЕСТНИЧНЫМИ И ЛЕСТНИЧНЫМИ ПЕРЕКРЫТЫМИ СХЕМАМИ

Если заданная функция любой степени имеет числитель, состоящий из одного члена $f_l p^l$ или f_0 , то функция реализуется схемами рис. 2, а или 2, б соответственно [9]. Процесс реализации, как и в предыдущем случае, состоит в составлении и решении уравнений (12), (13). Минимальное число элементов, требующееся для реализации такой функции, равно $2l+1$ (при $a_l \neq f_l$ или $a_0 \neq f_0$), а число уравнений, равное числу отличных от нуля коэффициентов полиномов функции K_1 , равняется $l+2$. Для того, чтобы привести в соответствие число уравнений и число неизвестных, следует дополнить систему (12), (13) уравнениями (14),

выбрав полином $e_k p^k + e_{k-1} p^{k-1} + \dots + e_0 = \Delta \begin{pmatrix} 2 \dots n-1 \\ 2 \dots n-1 \end{pmatrix}$ произ-

вольно, но так, чтобы его корни удовлетворяли условию (3). При этом появится дополнительное неизвестное — постоянный множитель e_k в правых частях уравнений (14), поскольку этот коэффициент выбором

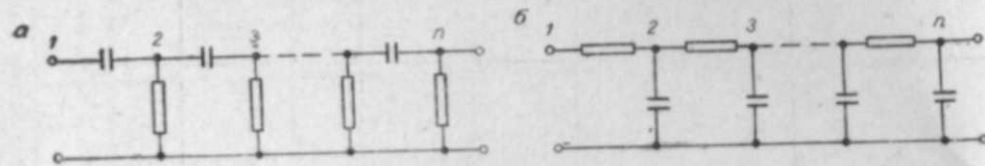


Рис. 2.

корней полинома $\Delta \begin{pmatrix} 2 \dots n-1 \\ 2 \dots n-1 \end{pmatrix}$ не определяется. Таким образом, число уравнений станет равным числу неизвестных, т. е. $2l+2$.

Пример 2. Реализовать функцию

$$K = \frac{8}{p^3 + 7p^2 + 14p + 8} = \frac{8}{(p+1)(p+2)(p+4)}.$$

Поскольку функция не имеет нулей передачи, она может быть реализована лестничной схемой с последовательными проводимостями при $n=4$ (рис. 2, б). Выбирается полином, равный минору $\Delta \begin{pmatrix} 2 \dots n-1 \\ 2 \dots n-1 \end{pmatrix}$

$$\Delta \begin{pmatrix} 2 \dots n-1 \\ 2 \dots n-1 \end{pmatrix} = e_2 (p+1,2)(p+3) = e_2 p^2 + 4,2e_2 p + 3,6e_2.$$

Матрица схемы (рис. 2, б) для $n=4$ в канонической системе координат и система уравнений (12), (13), (14) имеют вид:

g_1	$-g_1$		
$-g_1$	$pc_1 + g_1 + g_2$	$-g_2$	
	$-g_2$	$pc_2 + g_2 + g_3$	$-g_3$
		$-g_3$	$pc_3 + g_3$

$$\begin{aligned} g_1 g_2 g_3 &= 8 \\ c_1 c_2 c_3 &= 1 \\ c_1 c_2 g_3 + c_1 c_3 (g_2 + g_3) + \\ &+ c_2 c_3 (g_1 + g_2) = 7 \\ c_1 g_2 g_3 + c_2 g_3 (g_1 + g_2) + \\ &+ c_3 (g_1 g_2 + g_2 g_3 + g_1 g_3) = 14 \\ c_1 c_2 &= e_2 \\ c_1 (g_2 + g_3) + c_2 (g_1 + g_2) &= 4,2 e_2 \\ g_1 g_2 + g_3 (g_1 + g_2) &= 3,6 e_2. \end{aligned}$$

Решив эти уравнения, получим параметры элементов схемы:

$$g_1 = 10,6 \frac{1}{\text{ом}}; g_2 = 1,88 \frac{1}{\text{ом}}; g_3 = 0,412 \frac{1}{\text{ом}}; c_1 = 8 \phi; c_2 = 0,877 \phi; c_3 = 0,147 \phi.$$

Если функция K удовлетворяет условиям физической осуществимости лестничными перекрытыми схемами, то она реализуется схемами рис. 3, а и 3, б при $n=l+1$ [9]. Число неизвестных параметров этих схем равно $2l+2$, что соответствует числу уравнений (12), (13), решением которых эти параметры и определяются.

Пример 3. Реализовать функцию

$$K = \frac{p^3 + 2p^2 + 12p + 16}{p^3 + 14p^2 + 43p + 30}.$$

Эту функцию можно представить в виде

$$K = \frac{p^3 + 2(p+2)(p+4)}{(p+1)(p+3)(p+10)}.$$

Полином, образованный последними тремя членами числителя, имеет отрицательные вещественные корни, чередующиеся с корнями знаменателя. Следовательно, функция реализуется лестничной перекрытой схемой (рис. 3, а) при $n=4$ [9].

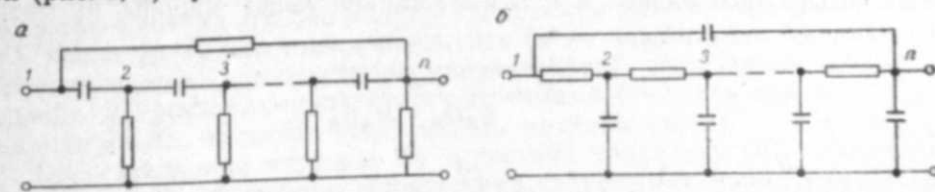


Рис. 3.

Матрица проводимости схемы и уравнения (12), (13) имеют вид

$$Y = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline pc_1 + g_4 & -pc_1 & & -g_4 \\ \hline -pc_1 & p(c_1 + c_2) + g_1 & -pc_2 & \\ \hline & -pc_2 & p(c_2 + c_3) + g_3 & \\ \hline -g_4 & & & pc_3 + g_3 + g_4 \\ \hline \end{array}$$

$$c_1 c_2 c_3 = 1$$

$$g_4(c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3) = 2$$

$$g_1 g_4(c_2 + c_3) + g_2 g_4(c_1 + c_2) = 12$$

$$g_1 g_2 g_4 = 16$$

$$g_1 c_2 c_3 + g_2(c_1 + c_2)c_3 + (g_3 + g_4)(c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3) = 14$$

$$g_1 g_2 c_3 + g_1(g_3 + g_4)(c_2 + c_3) + g_2(g_3 + g_4)(c_1 + c_2) = 43$$

$$g_1 g_2(g_3 + g_4) = 30$$

Решением этих уравнений определяются неизвестные параметры схемы:

$$g_1 = 6,77 \frac{1}{\text{ом}}; g_2 = 3,55 \frac{1}{\text{ом}}; g_3 = 0,52 \frac{1}{\text{ом}}; g_4 = 0,592 \frac{1}{\text{ом}}; c_1 = 0,972 \phi;$$

$$c_2 = 1,2 \phi; c_3 = 0,845 \phi.$$

Функция, реализованная в примере 3 схемой с 8 элементами, имеет один вещественный и два комплексных нуля передачи и реализуется методами Фиалкова — Герста схемой с 16 элементами, методом Гиллемина — схемой с 14 элементами и методом Дашера — схемой с 12 элементами.

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ КАСКАДНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ДВУХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Для целого ряда функций выше второй степени бывает затруднительно или даже невозможно определить конфигурации реализующих их схем с минимальным числом элементов. Такие функции следует реализовать каскадным или параллельным соединением четырехполюсников.

Каскадная реализация дает возможность в ряде случаев перейти от одной функции высокой степени к двум функциям более низких степеней. Как показано в [9], коэффициент передачи двух каскадно соединенных четырехполюсников A и B выражается через миноры их матриц в виде

$$K = \frac{N_A N_B}{D_A D_B + D'_A D'_B} \quad (15)$$

$$N_A = \Delta_A \begin{pmatrix} 1 \dots n-1 \\ 2 \dots n \end{pmatrix}; D_A = \Delta_A \begin{pmatrix} 2 \dots n \\ 2 \dots n \end{pmatrix}; D'_A = \Delta_A \begin{pmatrix} 2 \dots n-1 \\ 2 \dots n-1 \end{pmatrix}; \quad (16)$$

$$N_B = \Delta_B \begin{pmatrix} 1 \dots n-1 \\ 2 \dots n \end{pmatrix}; D_B = \Delta_B \begin{pmatrix} 2 \dots n \\ 2 \dots n \end{pmatrix}; D'_B = \Delta_B. \quad (17)$$

Представив заданную функцию в виде (15), мы можем реализовать отдельно четырехполюсники A и B так, чтобы их матрицы проводимости удовлетворяли условиям (16) и (17) соответственно.

Для того, чтобы определить возможность каскадной реализации, необходимо проделать следующее:

1. Числитель функции разложить на произведение двух полиномов

$$N = N_A \cdot N_B.$$

2. Знаменатель представить в виде суммы двух полиномов $D = D_1 + D_2$, степени которых отличаются не больше, чем на первом, а корни чередуются. Такое разложение выполняется произвольным выбором одного из полиномов так, чтобы его корни чередовались с корнями D , а коэффициенты были по абсолютной величине меньше. Второй полином получается как разность между D и выбранным полиномом [8, 9]. Группировка простых множителей D_1 и D_2 позволит выбрать D_A , D_B , D'_A и D'_B .

Если разложение удастся выполнить так, чтобы соблюдались условия физической осуществимости функций коэффициента передачи [9] для отношений $\frac{N_A}{D_A} = K_A$ и $\frac{N_B}{D_B} = K_B$ и условия (3) для соотношений между

корнями D_A и D'_A , D_B и D'_B , то заданная функция реализуется каскадным соединением двух четырехполюсников, у которых матрицы проводимости удовлетворяют условиям (16) и (17). Процесс реализации состоит в следующем.

1. На основании свойств функции K и условий физической осуществимости простых структур определяется конфигурация четырехполюсника A . Однако, поскольку матрица проводимости Y должна удовлетворять условиям (16), система уравнений для определения неизвестных параметров включает в себя выражения (14). Число уравнений станет больше числа неизвестных параметров. Чтобы устранить это несоответствие, следует добавить в схему несколько элементов так, чтобы они не влияли на функцию K , изменяя минор $\Delta_A \begin{pmatrix} 2 \dots n-1 \\ 2 \dots n-1 \end{pmatrix}$. Это достигается

добавлением RC-двухполюсника последовательно с выходными зажимами четырехполюсника A . Если среди добавляемых элементов имеются емкости, то правые части всех уравнений умножаются на полином с неизвестными коэффициентами, степень которого равна числу добавляемых элементов C .

2. Составляются матрица Y_A и уравнения (12), (13), (14). Решением уравнений определяются неизвестные параметры четырехполюсника A .

3. Выбирается конфигурация схемы четырехполюсника B , соответствующая функции K_B . Поскольку Y_B должна удовлетворять условиям (17), число уравнений может превысить число неизвестных параметров. Устранение этого несоответствия производится включением дополнительного RC-двухполюсника между зажимами 0—1, так как эта ветвь, не влияя на K_B , изменяет определитель матрицы схемы.

4. Составляются матрицы Y_B и система уравнений (8), (12), (13). Решением этих уравнений определяются неизвестные параметры схемы четырехполюсника B .

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ
КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ
ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Параллельным соединением четырехполюсников может быть реализована любая функция, удовлетворяющая условиям физической осуществимости коэффициента передачи RC-схем [9]. Коэффициент передачи параллельного соединения m четырехполюсников выражается через миноры их матриц в виде

$$K = \frac{\sum_{j=A}^M \frac{N_j}{D_j}}{\sum_{j=A}^M \frac{D_j}{D_j}}, \quad (18)$$

где

$$N_j = \Delta_j \begin{pmatrix} 12 \dots n-1 \\ 2 \dots n \end{pmatrix}; D_j = \Delta_j \begin{pmatrix} 2 \dots n \\ 2 \dots n \end{pmatrix}; D' = \Delta_j \begin{pmatrix} 2 \dots n-1 \\ 2 \dots n-1 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Представив заданную функцию в виде (18), мы можем реализовать каждый из четырехполюсников, используя условия (19), которым должны удовлетворять миноры их матриц.

Процесс реализации состоит из нескольких операций.

1. Разложение D на сумму m слагаемых производится в следующем порядке. Сначала D разлагается на сумму двух полиномов $D = D_A + D''$, где $D'' = D_B + D_C + \dots + D_M = \sum_{q=0}^{l-1} a_q p^q$. Для этого выбирается по-

лином $D_A = a_{A1}(p - p'_{A1})(p - p'_{A2}) \dots (p - p'_{Al})$, корни которого чередуются с корнями D , и коэффициент при высшей степени $a_{A1} = a_l$. Сумма остальных полиномов определяется как разность $D'' = D - D_A$. Затем этот полином вновь разлагается на сумму двух полиномов. Для этого выбирается $D_B = a_{B1}(p - p'_{B1}) \dots (p - p'_{B(l-1)}) = \sum_{q=0}^{l-1} a_{Bq} p^q$, корни которого чередуются с корнями D_A следующим образом: $p'_{A1} \leq p'_{B1} < p'_{A2} \dots \leq p'_{B(l-1)} < p'_{Al}$. Чтобы коэффициенты D_B не превышали по величине коэффициентов полинома D'' , его $(l+1)$ -й коэффициент должен удовлетворять неравенству $a_{B(l+1)} \leq a_{l+1} \frac{a_0}{a_{B0}}$. Выбрав полином D_B ,

его вычитают из D'' и получают сумму оставшихся слагаемых, из которых затем выделяют D_C , и так до последнего. Разложение, выполненное таким образом, обеспечивает возможность выбора такого полинома P , который является минором типа $\Delta \begin{pmatrix} 2 \dots n-1 \\ 2 \dots n-1 \end{pmatrix}$ для всех четырехполюсников,

$$P = D'_A = D'_B = \dots = D'_M.$$

2. Числитель функции разлагается на сумму m слагаемых. Следует стремиться выполнить разложение так, чтобы N_A содержал простые множители полинома D_A

$$N_A = f_{Ah}(p - p'_{A1})(p - p'_{A2}) \dots (p - p'_{Ah}),$$

где

$$p'_{A1} = p'_{A1}; p'_{A2} = p'_{A2}; \dots p'_{Ah} = p'_{Ah}.$$

3. Выбирается полином P степени $l-1$. Его корни должны чередоваться с корнями D_A , причем наименьший по абсолютной величине принадлежит D_A . Чтобы упростить функцию D_A и, следовательно, сократить число элементов схемы, удобно выбирать h корней P , равных корням N_A

$$P = (p - p'_{A1})(p - p'_{A2}) \dots (p - p'_{Ah})(p - p_{P(h+1)}) \dots (p - p_{P(l-1)}),$$

где

$$p'_{A1} = p'_{A1}; p'_{A2} = p'_{A2}; \dots p'_{Ah} = p'_{Ah};$$

$$p_{P(h+1)} > p_{A(h+1)}; \dots p_{P(l-1)} > p_{A(l-1)}.$$

4. Четырехполюсники A, B, \dots, M реализуются по их коэффициентам передачи и минорам $\Delta \begin{pmatrix} 2 \dots n-1 \\ 2 \dots n-1 \end{pmatrix}$ так же, как в случае каскадного соединения. Для четырехполюсника A все полиномы сокращаются на общие множители так, что функция K_A и минор D_A приобретают вид

$$K_A = \frac{f_h}{a_{l-1}(p - p'_{A(h+1)}) \dots (p - p'_{A(l-1)})};$$

$$D_A = (p - p_{P(h+1)}) \dots (p - p_{P(l-1)}).$$

Пример 5. Реализовать функцию

$$K = \frac{p^3 + 2p^2 + 0,72p}{p^3 + 2,8p^2 + 2,25p + 0,45}$$

параллельным соединением двух четырехполюсников.

1. Разлагаем знаменатель на сумму двух полиномов:

$$D = (p+0,3)(p+1)(p+1,5),$$

$$D_A = p(p+0,6)(p+1,2) = p^3 + 1,8p^2 + 0,72p,$$

$$D_B = D - D_A = p^3 + 1,53p + 0,45.$$

2. Разлагаем числитель на сумму двух полиномов:

$$N_A = p(p+0,6)(p+1,2) = p^3 + 1,8p^2 + 0,72p; N_B = 0,2p^2.$$

3. Выбираем полином $P = (p+0,6)(p+1,2) = p^2 + 1,8p + 0,72$.

4. Заданная функция может быть представлена в виде

$$K = \frac{\frac{p}{1} + \frac{0,2p^2}{p^2 + 1,8p + 0,72}}{\frac{p}{1} + \frac{p^3 + 1,53p + 0,45}{p^2 + 1,8p + 0,72}}$$

5. Реализуем четырехполюсник А. $K_A = \frac{p}{p}$; $D_A = 1$. Этим функциям соответствует схема, в которой единственная емкость $c_{1A} = 1$ (рис. 4, а).

6. Реализуем четырехполюсник В. $K_B = \frac{0,2p^2}{p^2 + 1,53p + 0,45}$; $D_B = p^2 + 1,8p + 0,72$. Эти функции могут быть реализованы лестничной схемой

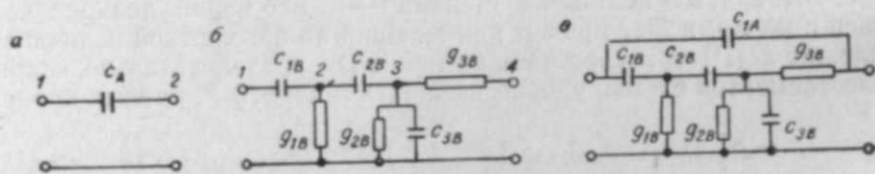


Рис. 4.

(рис. 4, б). Матрица Y_B и уравнения (12), (13), (14) имеют вид

$$Y_B = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline pc_1 & -pc_1 & & \\ \hline -pc_1 & p(c_1 + c_2) + g_1 & -pc_2 & \\ \hline & -pc_2 & p(c_2 + c_3) + g_2 + g_3 & -g_3 \\ \hline & & -g_3 & g_3 \\ \hline \end{array}$$

$$c_1 c_2 g_3 = 0,2k_B,$$

$$(c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3) g_3 = k_B,$$

$$(c_1 + c_2) g_2 g_3 + (c_2 + c_3) g_1 g_3 = 1,53k_B,$$

$$g_1 g_2 g_3 = 0,45k_B, \quad c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3 = k_B,$$

$$(c_1 + c_2)(g_2 + g_3) + (c_2 + c_3) g_1 = 1,8k_B,$$

$$g_1 (g_2 + g_3) = 0,72k_B.$$

Решив систему уравнений, получим

$$g_{1B} = 3,46 \frac{1}{\text{ом}}; \quad g_{2B} = 1,66 \frac{1}{\text{ом}}; \quad g_{3B} = 1 \frac{1}{\text{ом}};$$

$$c_{1B} = 2,4 \text{ ф}; \quad c_{2B} = 1,06 \text{ ф}; \quad c_{3B} = 2,96 \text{ ф}.$$

7. Схема, реализующая заданную функцию К, изображена на рис. 4, в.

* * *

Как видно из рассмотренных случаев, при реализации схем каскадным или параллельным соединением часто получаются схемы с неминимальным числом элементов. При этом чем больше «лишних» элементов добавляется в схему, тем большая свобода допускается в выборе ее конфигурации. Возможен также выбор и тех схем, которые получаются при реализации известными методами Фиалкова — Герста, Гиллемина и

Дашера. Например, если при параллельной реализации коэффициенты передачи отдельных четырехполюсников постепенным понижением степени довести до вида функции 1 (см. таблицу), то в результате получится схема Фиалкова — Герста. Если же разложить числитель функции на m слагаемых так, чтобы каждое из них имело вещественные отрицательные корни, то параллельная реализации может привести к схеме Гиллемина. При помощи каскадной реализации можно получить в результате схему Дашера.

Таким образом, метод, основанный на использовании матрицы проводимости, можно считать общим и все существующие методы рассматривать как его частные случаи.

Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
12/1 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Балабанян, Синтез электрических цепей. М., ГЭИ, 1961.
2. В. А. Тафт, Основы методики расчета линейных электрических цепей по заданным их частотным характеристикам. М., Изд-во АН СССР, 1954.
3. E. Guillemin, Synthesis of Passive Networks, N. Y., 1957.
4. В. П. Сигорский, Методы анализа электрических схем с многополюсными элементами. Киев, 1958.
5. В. П. Сигорский, Анализ электронных схем. Киев, 1960.
6. E. Guillemin, Introductory Circuit Theory. N. Y., 1953.
7. О. Л. Бандман, Общий подход к синтезу RC-двухполюсников. «Электрические методы автоматического контроля». Тр. ИАЭ СО АН СССР, 7, 1963.
8. О. Л. Бандман, Признаки физической осуществимости матриц проводимости RC-схем. Изв. Сиб. отд. АН СССР, № 8, 1962.
9. О. Л. Бандман, Признаки физической осуществимости коэффициента передачи RC-схем. Изв. Сиб. отд. АН СССР, № 6, сер. техн. наук, вып. 2, 1963.

Ю. Т. БОРЩЕВСКИЙ, Н. А. ЯКОВЛЕВ

О ДВУХФАЗНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

При изучении двухфазных потоков необходимо рассматривать совместное движение как жидкой, так и твердой фаз, т. е. учитывать их силовое взаимодействие. Большие возможности для изучения таких потоков дают общие дифференциальные уравнения, опубликованные в работе [1].

На основе этих уравнений в данной статье рассматривается задача о характере распределения по сечению равномерного потока, насыщенного твердой зернистой фазой, касательных напряжений и осредненных продольных скоростей.

В случае отсутствия межфазовых переходов за основу возьмем уравнения движения жидкой компоненты в следующем виде [1]:

$$\rho \frac{\partial(1-s)}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (1-s) \vec{v} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{D}{dt} [(1-s) \vec{v}] = \rho(1-s) \vec{g} + (1-s) \Delta \cdot \Pi_{jk} + \vec{E}, \quad (2)$$

где \vec{v} — вектор скорости жидких частиц;
 ρ — массовая плотность жидкой фазы;
 s — объемная концентрация твердых частиц;
 Π_{jk} — тензор молекулярных напряжений;
 t — время;
 \vec{g} — вектор ускорения массовых сил;
 \vec{E} — вектор сил взаимодействия твердых и жидких частиц;
 $\frac{D}{dt}$ — оператор субстанциональной производной.

Уравнения (1) и (2) являются осредненными по объемно-временному цилиндру.

Спроектируем уравнение переноса импульсов (2) на ось координат x . Имеем:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial(1-s)v_x}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial(1-s)v_x}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial(1-s)v_x}{\partial y} = \\ = (1-s) \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \rho v \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \right] + E_x, \end{aligned} \quad (3)$$

где v — коэффициент кинематической вязкости;
 p — статическое давление.

Индексы x и y указывают, что обозначенные величины являются проекциями соответствующих векторов на координатные оси x и y .

Считаем, что установившийся во времени поток направлен вдоль x . Тогда, раскрывая осреднение, для осредненного потока сразу получим выражение:

$$\frac{\partial \bar{\tau}}{\partial y} = \rho v \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y^2} - \overline{\rho v_x v_y} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \bar{f}(x, y), \quad (4)$$

где $\bar{\tau}$ — касательное напряжение трения в жидкой фазе;

$$\begin{aligned} \bar{f} = -\bar{E}_x + \bar{s} \left(\rho v \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial y^2} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \overline{s' v \left(\frac{\partial^2 v_x'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x'}{\partial y^2} \right)} \rho - \\ - \overline{s' \frac{\partial p'}{\partial x}} + \rho \frac{v_x'^2}{\partial x}. \end{aligned} \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) штрих означает пульсации соответствующих величин, а черта — знак осреднения.

Уравнение (4) выражает зависимость между вязкими напряжениями, корреляцией Рейнольдса $\overline{v_x' v_y'}$, давлениями и силами взаимодействия между твердыми и жидкими частицами.

В дальнейшем примем: $\bar{v}_x = \bar{u}$, $v_x' = u'$ и $v_y' = v'$.

Для равномерного потока, направленного вдоль оси x , как известно, можно положить

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = c_1 = \text{const.}$$

На основании (4) будем иметь:

$$\bar{\tau} = \rho v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u' v'} = c + c_1 y + \int \bar{f} dy. \quad (6)$$

Для однофазного потока $\int \bar{f} dy = 0$.

В этом случае выражение (6) принимает вид известной формулы, выражающей линейный закон распределения турбулентного касательного напряжения $\bar{\tau}_0$ в однофазном потоке [2]:

$$\bar{\tau}_0 = \rho v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u' v'} = c_0 + c_{01} y. \quad (7)$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_0 = \bar{\tau}_{\text{ост}} \text{ при } y = 0, \\ \bar{\tau}_0 = 0 \text{ при } y = h, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\bar{\tau}_{\text{ост}}$ — напряжение трения на дне однофазного потока;
 h — глубина потока;

позволяют определить постоянные, входящие в (7):

$$c_0 = \bar{\tau}_{\text{ост}}, \quad c_{01} = -\frac{\bar{\tau}_{\text{ост}}}{h}.$$

Предположим, что в уравнении (6) $c = \bar{\tau}_{\text{ст}}$. Тогда граничные условия (8) дают:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{\text{ст}} &= \bar{\tau}_{\text{ост}} + \int \bar{f} dy \Big|_{y=0}, \\ c_1 &= -\frac{\bar{\tau}_{\text{ст}}}{h}. \end{aligned} \quad (9)$$

В соответствии с работами [3, 4] предположим также, что для одно- и двухфазного потоков закономерна зависимость:

$$-\rho \bar{u}' v' = 2a^2 \rho y \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}, \quad (10)$$

где a — опытная постоянная.

Для глубокого потока $c_1 \sim 0$. Подставляя (10) в выражение (7), после интегрирования для профиля продольных осредненных скоростей однофазного потока получаем следующую известную формулу [3]:

$$y = \delta \operatorname{erf} \varphi \exp \varphi^2, \quad (11)$$

где $\delta = v \frac{\sqrt{2\pi}}{a v_*}$ — абсолютная высота выступов шероховатости дна потока;

$$v_* = \sqrt{\frac{\bar{\tau}_{\text{ост}}}{\rho}} \text{ — динамическая скорость;}$$

$\operatorname{erf} \varphi$ — функция Крампа;

$$\varphi = \frac{a \bar{u}}{v_*};$$

\bar{u} — осредненная продольная скорость в однофазном потоке.

При определении профиля осредненных скоростей u двухфазного потока выражение (11) можно рассматривать как первое приближение решения уравнения (6). Поэтому, основываясь на методе Пикара [5], (6) можно записать для глубокого потока в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} (v + 2a^2 \bar{u} \operatorname{erf} \varphi \exp \varphi^2) &= c_0 + F(y), \\ (c_0 = \bar{\tau}_{\text{ст}}, \quad c_1 = -\frac{c_0}{h} \sim 0). \end{aligned} \quad (12)$$

Интегрирование последнего равенства дает второе приближение решения уравнения (6), которое является окончательным:

$$c + y + \int F dy = \delta \operatorname{erf} \varphi \exp \varphi^2, \quad (13)$$

где c — постоянная интегрирования.

Правая часть (13) при $\bar{u}=0$ равна δ . Поэтому при $y=\delta$ должно соблюдаться условие:

$$c + \int F dy \Big|_{y=\delta} = 0 \quad (14)$$

или

$$F \Big|_{y=\delta} = 0.$$

Таким образом, принятые нами предположения (9) являются правомерными.

Подберем высоту выступов шероховатости дна однофазного потока $\delta_1 = k \delta$ (где k — постоянный множитель) так, чтобы профили осредненных скоростей однофазного потока \bar{u}_0 и двухфазного потока \bar{u}_c были одинаковы. Тогда, учитывая (11) и (13), будем иметь:

$$\frac{v_{*0}^2}{a_0^2} \ln \frac{y}{\delta_1 \operatorname{erf} \varphi_0} = \frac{v_{*c}^2}{a_c^2} \ln \frac{y + c + \int \frac{\rho}{\tau_{\text{ст}}} F dy}{\delta \operatorname{erf} \varphi_c}. \quad (15)$$

В выражении (15) индекс «0» указывает, что обозначенные величины относятся к однофазному потоку.

Из последнего равенства следует:

$$c + \frac{\rho}{\tau_{\text{ст}}} \int F dy = \left(\frac{y}{\delta_1 \operatorname{erf} \varphi_0} \right)^{\frac{v_{*0}^2 a_c^2}{v_{*c}^2 a_0^2}} - \frac{y}{\delta \operatorname{erf} \varphi_c}. \quad (16)$$

На основании (13) и (16) для профиля осредненных скоростей двухфазного потока имеем окончательную формулу:

$$\bar{u}_c = \frac{v_{*0}}{a_0} \sqrt{\ln \frac{y}{k \delta \operatorname{erf} \varphi_0}}. \quad (17)$$

Из формулы (17) вытекает следующий важный вывод: при насыщении потока твердыми частицами происходит кажущееся увеличение шероховатости δ в k число раз.

Величина k , учитывающая влияние насыщения \bar{s} на профиль скоростей потока, была введена на основании обработки многочисленного экспериментального материала в работе [3]. Там же было показано, что формула вида (17) весьма хорошо согласуется с экспериментом.

Запишем выражение для δ_1 :

$$\delta_1 = k \delta = \frac{k v \sqrt{2\pi}}{a_0 \sqrt{\frac{\bar{\tau}_{\text{ст}}}{\rho}}} = \frac{y}{a_0} \frac{\sqrt{2\pi\rho}}{\sqrt{\frac{\bar{\tau}_{\text{ст}}}{k^2}}}. \quad (18)$$

Второй вывод, как следует из (18), заключается в том, что кажущееся увеличение шероховатости δ происходит за счет уменьшения корреляции Рейнольдса на дне двухфазного потока.

Замечая, что в формулу (17) для скорости двухфазного потока входят величины v_{*0} и a_0 , определяющие движение однофазного потока, выражение (16) можно переписать в следующем виде:

$$y \left(\frac{1}{k} - 1 \right) = c + \frac{\rho}{\tau_{cr}} \int F dy. \quad (19)$$

Откуда следует

$$F = v_*^2 \left(\frac{1}{k} - 1 \right) = \text{const.} \quad (20)$$

Подставляя (20) в (6) и сравнивая затем полученное выражение с формулой (7), приходим к заключению, что закон распределения касательных напряжений по сечению одно- и двухфазного потоков одинаков.

Для сравнения характера изменения τ в одно- и двухфазном потоках нами были выполнены специальные эксперименты в аэродинамическом канале сечением 250×200 мм. Результаты опытов приведены на рисунке, где по оси ординат отложены безразмерные значения τ_6 , равные

$$\tau_6 = r = \frac{\tau}{\rho \bar{u}_{10}^2},$$

где \bar{u}_{10} — скорость потока на оси канала;
 τ — касательное турбулентное напряжение трения.

По оси абсцисс отложена безразмерная высота, равная

$$\eta_b = \frac{2y}{H},$$

Изменение безразмерной коррекции Рейнольдса $\frac{\bar{u}^2 v'}{v_{10}^2}$ в одно- и двухфазных потоках.

r — $v_{10} = 9,68$ м/сек — однофазный поток; \times — $v_{10} = 7,50$ м/сек, Δ — $v_{10} = 8,66$ м/сек — двухфазный поток. Пунктирная кривая нанесена по перепаду давления.

При эксперименте в качестве твердой фазы служил речной кварцевый песок. Изменения τ производились термоанемометрическим методом, разработанным Рейхардтом [6].

Анализ опытных результатов, приведенных на рисунке, показывает, что в пределах точности измерений изменение кривых r для одно- и двухфазного потоков происходит по закону, близкому к линейному. Кроме того, в насыщенном потоке действительно имеет место падение r вблизи твердой границы потока, что согласуется с теоретическими выводами.

Транспортно-энергетический институт
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирский институт инженеров водного транспорта

Поступила в редакцию
3/III 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. А. К. Дюнин, Общие дифференциальные уравнения двухфазных потоков. Изв. СО АН СССР, № 10, 1961.
2. Г. Шлихтинг, Теория пограничного слоя. М., ИЛ, 1956.
3. А. К. Дюнин, О полумпирической теории турбулентного пограничного слоя. Изв. СО АН СССР, № 5, 1959.
4. И. И. Коновалов, Свободные турбулентные струи жидкости. Тр. ЛИИВТ, вып. XIV, 1947.
5. В. И. Смирнов, Курс высшей математики. М., Гостехтеориздат, 1956.
6. H. Reihardt, Messungen turbulenter Schwankungen. Naturwissenschaften, N 24/25, 1938.

И. П. ДРУЖИНИН, З. П. КОНОВАЛЕНКО,
Н. В. ХАМЬЯНОВА

ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ СТОКА СОСЕДНИХ ЛЕТ НА РЕКАХ АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ СССР С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Современные представления о характере связи стока соседних лет почти полностью ограничиваются теми данными, которые получены П. А. Ефимовичем [1] еще в 1936 г. Между тем изучение этих связей может быть очень полезно для целого ряда направлений исследований как чисто гидрологического, так и прикладного характера.

Первостепенный интерес с этой точки зрения представляет изучение циклических колебаний стока рек, уровней озер и т. д. на основе различных данных за прошлое время. Исследования в названной области [2, 3 и др.], на наш взгляд, убедительно показывают наличие повторяющихся волн (тенденций) снижения общей водности рек, сменяющихся затем волнами (тенденциями) повышения ее и т. д. Продолжительность волн различна — от нескольких лет до десятков и сотен лет.

Эти исследования представляют большую ценность, однако следует признать, что их выводы в основном базируются на визуальных оценках, обычно оправдывающихся лишь в наиболее очевидных случаях, и не позволяют выявить скрытые периодичности, регулярную цикличность и т. п.

В настоящее время, как нам кажется, уже имеются возможности для использования не только визуальных, но и количественных характеристик (являющихся в то же время характеристиками связи стока соседних лет, разделенных изменяющимся интервалом времени) для изучения регулярной цикличности, что поможет более уверенно ориентироваться в названных вопросах.

Важное значение имеет изучение возможностей для представления процесса стока как вероятностного (или стохастического) процесса, приближенно описываемого одним из методов, разработанных в теории вероятностей. При этом в большинстве случаев предлагается представлять процесс стока марковским процессом [4, 5 и др.], хотя неясно еще, насколько это возможно.

Возникает вопрос о репрезентативности натуральных наблюдений, которые в лучшем случае могут быть приняты в качестве одной единственной реализации процесса и т. д. Ряд вопросов этого направления может быть разрешен в настоящее время путем изучения связей стока соседних лет.

Наиболее рациональным, на наш взгляд, для решения поставленной задачи является использование характеристик, аналогичных обычным числовым характеристикам стохастического процесса или случайной функции, в качестве которых принимаются математическое ожидание, дисперсия и корреляционная функция. Особый интерес представляет выявление свойств характеристики, аналогичной корреляционной функции

стохастического процесса, которую для краткости будем называть просто корреляционной функцией ряда (стокового и др.).

Насколько нам известно, такой метод исследования связи стока соседних лет, разделенных последовательно нарастающим промежутком времени, предложен в 1957—1958 гг. сотрудницей Энергетического института им. Г. М. Кржижановского Н. С. Шарашкиной.

Аналогичные построения выполнены сотрудниками Колорадского университета (США) на материале стоковых рядов бассейна р. Колорадо [6]. В. Крессер [7] также указывает на автокорреляционный способ как на один из возможных способов анализа колебаний стока рек и гидрологических прогнозов.

Перечисленные работы выполнены в основном на ограниченном материале и не позволили раскрыть все возможности этого метода, в частности для изучения связи стока соседних лет, регулярной цикличности колебаний стока и т. д. Следует отметить, что построение корреляционных функций по длинным стоковым рядам в массовом масштабе практически стало возможным лишь в результате использования быстродействующих электронных счетных машин.

В настоящей статье изложены некоторые результаты исследований, проводимых применительно к рекам и озерам азиатской части СССР с использованием счетной машины БЭСМ-2 Энергетического института СО АН СССР.

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Корреляционная функция стокового ряда может быть представлена:

$$r(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (Q_i - \bar{Q}') (Q_{i+\tau} - \bar{Q}'')} {\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n-\tau} (Q_i - \bar{Q}')^2 \right] \left[\sum_{i=\tau}^n (Q_{i+\tau} - \bar{Q}'')^2 \right]}} = f(\tau), \quad (1)$$

где Q_i — расход, соответствующий моменту (интервалу, равному секунде, суткам, неделе, месяцу, году) времени i ;

$Q_{i+\tau}$ — расход, соответствующий моменту времени $i+\tau$;

τ — промежуток времени (0, 1, 2, 3, 4, 5... суток, месяцев, лет), через который анализируется связь стока соседних интервалов времени;

\bar{Q}'' — средняя величина расхода за число интервалов времени, уменьшенное на τ , начиная с начала стокового ряда;

\bar{Q}' — то же, начиная с конца исходного стокового ряда;

n — число членов исходного стокового ряда;

$r(\tau)$ — коэффициент корреляции связи стока соседних лет, разделенных промежутком времени τ .

Формула (1) применяется обычно при подсчете коэффициента корреляции связи стока непосредственно смежных лет, через один и через два года.

Отличительной чертой предлагаемой корреляционной функции является построение зависимости этого коэффициента корреляции от τ при последовательном его увеличении.

Корреляционная функция стокового ряда (1) почти аналогична нормированной автокорреляционной [8] или корреляционной функции [9] стационарного случайного процесса. Разница заключается лишь в том, что

в последнем случае принимается $\bar{Q}' = \bar{Q}'' = \bar{Q} = \text{const}$. Функция (1) имеет также некоторую аналогию по отношению к сечению корреляционной поверхности случайного процесса (общего типа) при $t = t_0 = \text{const}$ [8].

АНАЛИЗ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Чтобы легче понять существо предлагаемых зависимостей и возможность выявления с их помощью регулярной цикличности колебаний, полезно, видимо, начать анализ с наиболее ясного и наглядного примера — солнечной активности, характеризуемой числами Вольфа, достаточно полно отображающими ультрафиолетовую радиацию [3].

Известно, что в колебаниях солнечной активности установлено несколько видов циклов: 10—11-летние; двойные, т. е. 22—23-летние циклы; считается весьма вероятным наличие векового цикла, состоящего из семи-восьми 10—11-летних или из четырех 22—23-летних циклов с истинной средней длительностью 80—90 лет; предполагается существование сверхвекового цикла, примерно равного двойному вековому, а некоторые авторы пришли к выводу о существовании более продолжительных циклов (200—300-летнего, 600-летнего и даже 1500—2000-летнего циклов) [3].

Если предлагаемая зависимость (1) способна отобразить проявление регулярной цикличности (или элементов периодичности), то в первую очередь это должно обнаружиться на примере солнечной активности. Действительность подтверждает это предположение.

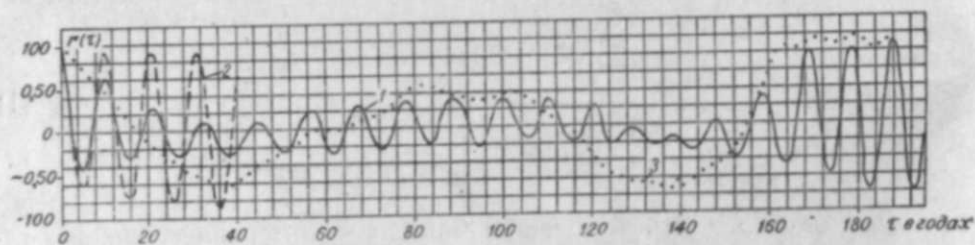


Рис. 1. Зависимость коэффициентов корреляции показателей солнечной активности (числа Вольфа) $r(\tau)$ от последовательно нарастающего промежутка времени между ними τ :

1 — за период 1749—1958 гг.; 2 — за период 1901—1955 гг.; 3 — по средним за десятилетия со скользящими календарными границами.

Названная зависимость, построенная по 210-летнему ряду наблюдений (1749—1958 гг.), представлена на рис. 1. Она имеет вполне определенный волнообразный ход с промежутками между гребнями 9—12 лет. Наиболее четок гребень при $\tau = 10$ —11 лет ($r = 0,62$). Высокий положительный коэффициент корреляции ($r = 0,62$) свидетельствует о том, что существует вполне очевидная тенденция к появлению относительно одинаковых показателей солнечной активности через каждые 10—11 лет (максимумы и минимумы появляются регулярно через 10—11 лет). В связи с тем, что циклы солнечной активности при преобладающей продолжительности 10—11 лет колеблются от 8 до 17 лет, величина коэффициента корреляции меньше единицы. Отрицательный коэффициент корреляции при $\tau = 5$ лет также свидетельствует о существовании 10—11-летней цикличности.

Кроме первого гребня, отчетливо выделяются 2, 3, 4... 18 гребни, следующие регулярно один за другим. Они свидетельствуют о тенденции к

образованию циклов, кратных 10—11-летнему. На рис. 1 видна также вторая волна, влияющая на 10—11-летнюю цикличность, продолжительность которой может быть определена по максимуму, приходящемуся на 89-й год, что подтверждает тенденцию к вековой цикличности продолжительностью 80—90 лет. Второй максимум, приходящийся на период 160—180 лет, видимо, свидетельствует о существовании двойного векового цикла*.

Особо следует отметить существенное увеличение коэффициентов корреляции ($r = 0,92$ при $\tau = 188$ лет) при больших значениях τ , которое наблюдается почти во всех случаях. Это объясняется, видимо, тем, что, кроме совпадения максимумов 10—11-летнего цикла и кратных ему, существенное влияние оказывает уменьшение ряда взаимно увязываемых величин.

В то же время столь высокий коэффициент корреляции, несомненно, свидетельствует о значительной схожести колебаний показателей солнечной активности, разделенных промежутком времени в 170—190 лет.

Таким образом, предложенная зависимость позволяет выявить циклы как относительно короткие (10—11 лет), так и очень продолжительные (80—90 и 160—180 лет). Она может быть использована и для сравнительной количественной оценки силы проявлений тенденций к различной цикличности путем сравнения величин коэффициентов корреляции. Однако в последнем случае нужно соблюдать осторожность, так как изменчивость малых циклов часто оказывает очень сильное влияние на коэффициенты корреляции, характеризующие большие циклы.

СВЯЗЬ СТОКА СОСЕДНИХ ЛЕТ

Для выявления характера связи стока соседних лет при последовательно нарастающем промежутке времени между ними проведены массовые расчеты по ряду рек и озер, имеющих длительные ряды гидрометрических наблюдений (см. таблицу). Результаты расчетов представлены на рис. 2—5, по которым видно, что корреляционные функции связи стока соседних лет весьма разнообразны на различных реках. Все они представляют собой волнистые кривые с различными промежутками времени между гребнями. Иногда гребни по высоте очень близки друг к другу (Амур, Енисей — ств. Саянской ГЭС и др.). Иногда наблюдаются отдельные (один-два) особо выдающиеся пики.

Наиболее четко это проявилось на приточности в оз. Байкал — $\tau = 26$ лет, на Енисее у с. Базанхи — $\tau = 31$ год, на р. Зее — $\tau = 17$ и 34 года (см. рис. 2), на р. Оби — $\tau = 44$ года, на Томи — $\tau = 37$ лет, на р. Бии — $\tau = 42$ года, Иртыше — $\tau = 37$ лет, Нарыне — $\tau = 31$ год, на реках Или, Чирчике, Аму-Дарье — $\tau = 20$ лет, уровни Аральского моря — $\tau = 21$ год, уровни Каспийского моря — $\tau = 82$ года и др.

Кроме выдающихся пиков, обычно имеется несколько меньших пиков. Величины наибольших (по абсолютному значению) коэффициентов корреляции по всем рекам представлены в таблице.

Для общей оценки значимости отдаленных корреляционных связей полезно провести сравнение коэффициентов корреляции непосредственно смежных лет и их среднеквадратичных ошибок с наибольшими из полу-

* Как показали последующие проработки, более точно продолжительность векового цикла может быть определена по корреляционной функции ряда, представленного средними за десятилетия со скользящими календарными границами в 10 лет. По этим данным продолжительность векового цикла равна 82 годам, а двойного векового — 163—164 годам (рис. 1, кривая 3).

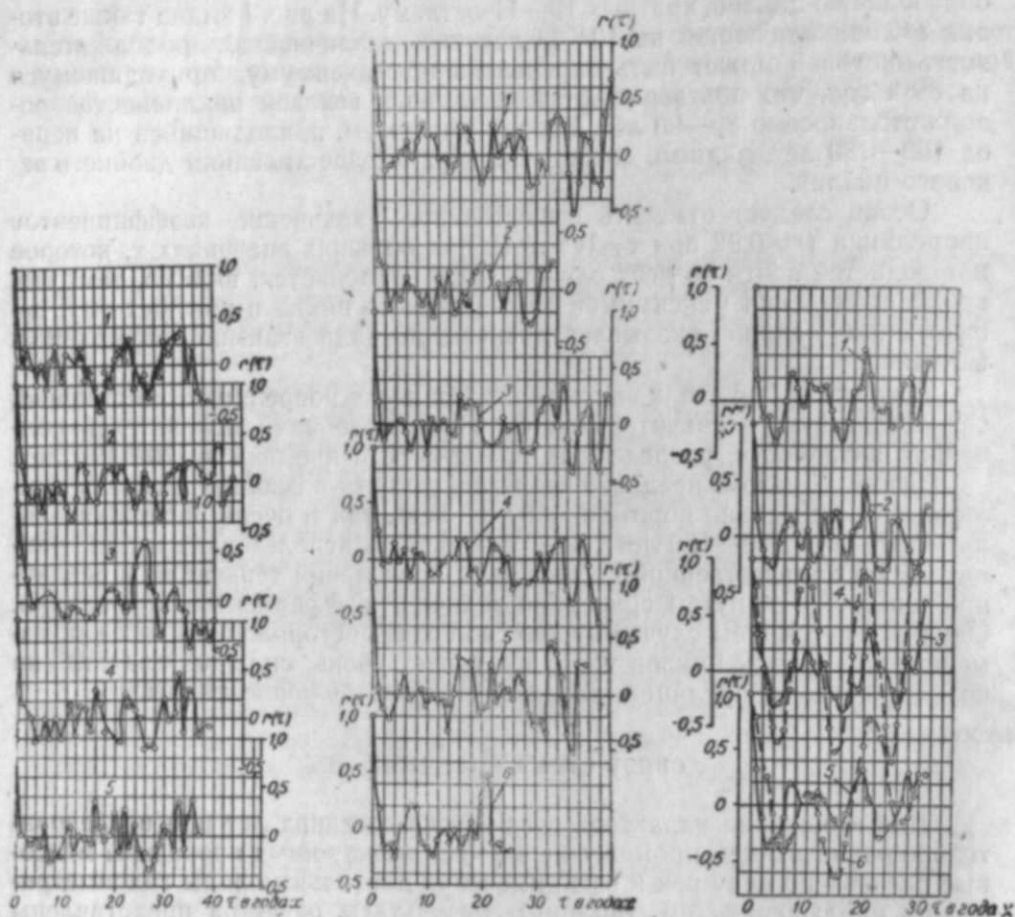


Рис. 2. Зависимости коэффициентов корреляции стока соседних лет $r(\tau)$ от последовательно нарастающего промежутка времени между ними τ :

1 — р. Зей — ур. Зейские ворота; 2 — р. Амур — г. Хабаровск; 3 — приток в оз. Байкал; 4 — р. Енисей — с. Базайха; 5 — р. Енисей — ств. Саянской ГЭС.

Рис. 3. Зависимость коэффициентов корреляции стока соседних лет $r(\tau)$ от последовательно нарастающего промежутка времени между ними τ :

1 — р. Обь — г. Новосибирск; 2 — р. Амур — с. Покровка; 3 — р. Томь — г. Новокузнецк; 4 — р. Бия — г. Бийск; 5 — р. Иртыш — ств. Шульбинской ГЭС; 6 — р. Кингир — с. Кингир.

Рис. 4. Зависимости коэффициентов корреляции стока соседних лет $r(\tau)$ от последовательно нарастающего промежутка времени между ними τ :

1 — р. Чирчик — ст. Ходжикент; 2 — р. Или — с. Илийское; 3 — р. Нарын — г. Уч-Курган; 4 — солнечная активность (числа Вольфа); 5 — р. Аму-Дарья — г. Керки; 6 — среднегодовые уровни Аральского моря.

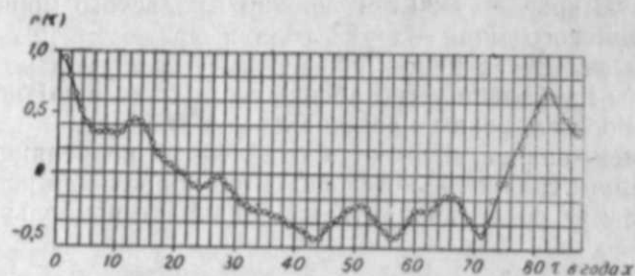


Рис. 5. Зависимость коэффициентов корреляции среднегодовых уровней Каспийского моря соседних лет $r(\tau)$ от последовательно нарастающего промежутка времени между ними τ .

Таблица коэффициентов корреляции смежных и дальних ($\tau > 1$) связей среднегодовых расходов рек и уровней морей

Рекa, пункт	Число членов ряда	Календарный период	Коэфф. корреляции непосредственно смежных лет	Наибольший коэфф. корреляции при $\tau > 1$	
				τ , лет	$r(\tau) \pm \sigma_r$
Амур — г. Хабаровск	59	1896—1954	$0,20 \pm 0,13$	41	$0,37 \pm 0,20$
Зей — ур. Зейские ворота	54	1901—1954	$0,02 \pm 0,14$	17	$-0,45 \pm 0,14$
Приток в оз. Байкал	55	1901—1955	$0,46 \pm 0,15$	26	$0,61 \pm 0,14$
Енисей — с. Базайха	54	1903/04—1956/57	$0,16 \pm 0,13$	33	$0,47 \pm 0,17$
Енисей — Саянская ГЭС	52	1903/04—1953/54	$0,01 \pm 0,14$	16	$0,35 \pm 0,15$
Томь — г. Новокузнецк	59	1894/95—1952/53	$0,20 \pm 0,13$	27	$-0,43 \pm 0,18$
Обь — г. Новосибирск	59	1894—1952	$0,28 \pm 0,12$	44	$0,67 \pm 0,14$
Бия — г. Бийск	58	1895—1952	$0,25 \pm 0,12$	42	$-0,56 \pm 0,18$
Кингир — с. Кингир	39	1916—1955	$0,18 \pm 0,16$	21	$0,47 \pm 0,18$
Иртыш — ств. Шульбинская ГЭС	54	1903/04—1956/57	$0,05 \pm 0,13$	37	$-0,52 \pm 0,18$
Или — с. Илийское	46	1911—1956	$0,14 \pm 0,15$	20	$0,43 \pm 0,16$
Чирчик — с. Ходжикент	46	1911—1956	$0,18 \pm 0,14$	20	$0,45 \pm 0,16$
Нарын — г. Уч-Курган	46	1911—1956	$0,33 \pm 0,13$	31	$0,62 \pm 0,18$
Аму-Дарья — г. Керки	45	1911—1955	$0,31 \pm 0,14$	20	$0,33 \pm 0,18$
Среднегодовые уровни Аральского моря	46	1911—1956	$0,77 \pm 0,06$	21	$0,77 \pm 0,08$
» » Каспийского моря	102	1838—1940	$0,94 \pm 0,01$	82	$0,71 \pm 0,11$
Неман — с. Смалинник	144	1812—1955	$0,20 \pm 0,08$	114	$-0,36 \pm 0,08$

ченных коэффициентов корреляции при последовательно нарастающем промежутке времени между соседними годами.

По данным таблицы видно, что во всех случаях (кроме крупных озер) максимальные коэффициенты корреляции стока соседних лет, разделенных промежутком времени $\tau > 1$ год, существенно превосходят коэффициенты корреляции стока непосредственно смежных лет при весьма близких по величине среднеквадратичных ошибках*.

На основании приведенных данных может быть сделан вывод о том, что если при водохозяйственных, гидрологических и иных расчетах считается необходимым учитывать связь стока непосредственно смежных лет (что можно считать наиболее распространенным мнением в настоящее время), то, видимо, нет никаких оснований для неучета значительно более сильных связей, проявляющихся через τ лет.

Этот вывод ставит под сомнение возможность и целесообразность использования простого процесса Маркова для описания процесса стока рассмотренных рек. Однако следует заметить, что уверенное и сознательное использование выявленных связей возможно лишь после их генетического объяснения, что не представляется возможным сделать в настоящее время.

Характерной особенностью всех рассмотренных корреляционных функций стоковых рядов (и ряда показателей солнечной активности) является увеличение размаха колебаний коэффициентов корреляции вокруг оси абсцисс при увеличении промежутка времени между соседними годами.

Сам этот факт свидетельствует, по крайней мере, о том, что, как правило, существуют весьма схожие (или противоположные при отрицательных r) отрезки стокового ряда, разделенные промежутком времени τ . Это обстоятельство, видимо, нельзя не учитывать при оценке водности на будущий период, так как в ряде случаев может быть получена очень ценная дополнительная информация.

Большой интерес представляет изучение поведения корреляционной функции при $\tau \rightarrow \infty$. Практически проследить это трудно, однако можно использовать некоторые длинные ряды. В качестве таковых могут быть взяты ряд показателей солнечной активности (см. рис. 1) и стоковый ряд р. Неман продолжительностью 144 года.

Анализ корреляционных функций названных рядов показал, что и в этих случаях наблюдается та же тенденция увеличения амплитуды колебаний коэффициентов корреляции. Такое положение свидетельствует или о недостаточности длины рядов (210 и 144 года), или о существовании вполне определенной закономерности.

Приведенные данные, во всяком случае, позволяют сделать вывод о том, что нужно учитывать весьма отдаленные по времени связи и предел в этом отношении в настоящее время, вероятно, не может быть установлен. Следует также отметить, что выявленное свойство колебаний стоковых рядов вполне объясняется теорией цикличности колебаний гидрометеорологических условий на больших территориях, следуя которой, видимо, нужно отказаться от поисков предела отрезка времени, при превышении которого можно было бы уже не учитывать взаимную связь стока. В свете этих соображений вряд ли целесообразно использовать сложный процесс Маркова для описания процесса стока рассмотренных рек.

Представляет интерес вопрос о влиянии продолжительности исходного ряда на характер корреляционной функции. Для его выяснения про-

* Оценка надежности приведенных коэффициентов корреляции по доверительной вероятности может быть проведена по данным таблицы.

ведены расчеты при изменяющейся длине стокового ряда р. Неман в пределах от 144 до 84 лет. Эти расчеты показали, что ход корреляционной функции почти не меняется, а амплитуда колебаний изменяется незначительно.

Изменение же календарных границ ряда при одинаковой его длине (рассмотрено 5 вариантов стокового ряда р. Неман длиной 84 года) оказывает существенное влияние как на характер корреляционной функции, так и на ее амплитуду. По-видимому, оно должно быть наибольшим в тех случаях, когда нет достаточно четкой регулярной цикличности, и наименьшим, — когда она имеется.

ЦИКЛИЧНОСТЬ КОЛЕБАНИЙ СТОКА

Подобно тому, как корреляционная функция показателей солнечной активности позволила провести детальный анализ цикличности, корреляционные функции стоковых рядов могут быть использованы для выявления регулярной цикличности (или периодичности) колебаний стока. Поскольку эта тема имеет вполне самостоятельное значение и будет освещена в наших последующих работах, здесь мы ограничимся лишь некоторыми частными замечаниями.

Возможность использования корреляционной функции для выявления регулярной цикличности совершенно очевидна в тех случаях, когда корреляционные функции очень четкие, правильные, с ясно выраженными волнами и высокими абсолютными значениями экстремальных коэффициентов корреляции. Наиболее ярким примером в этом отношении является корреляционная функция ряда среднегодовых уровней Аральского моря (см. рис. 4), которая четко характеризует 10—11-летнюю и кратную ей цикличность, лишь немного сдвинутую по сравнению с цикличностью солнечной активности.

Менее четки, но достаточно правильны корреляционные функции стоковых рядов рек Нарына, Аму-Дарьи, Чирчика (см. рис. 4), Зеи, притока в оз. Байкал (см. рис. 2), Оби (см. рис. 3), среднегодовых уровней Каспийского моря (см. рис. 5).

Другие реки характеризуются неопределенностью вызывается некоторыми отклонениями величин стока в отдельные годы от характеристик групп лет, определяющих маловодность или многоводность целых периодов, и легко снимается в случае представления стокового ряда в виде средних за более длительные (чем год) расчетные отрезки времени или средних за скользящие периоды в n лет.

На основании полученных корреляционных функций выявляется довольно отчетливая картина регулярной цикличности колебаний стока различных рек. Характерной особенностью этих колебаний является их большое разнообразие по территории азиатской части СССР.

Например, выявляются отчетливые тенденции к 10—11-летней и кратной ей цикличности р. Зеи, слабые тенденции к 6-летней и сильная к 25—26-летней цикличности притока в оз. Байкал, 8—9-летняя — Оби, 10—11-летняя — Нарына, 7-летняя — Аму-Дарьи и Или, слабая 10—11-летняя и сильная 21-летняя — для среднегодовых уровней Аральского моря, слабая 13-летняя и сильная 82-летняя — для среднегодовых уровней Каспийского моря.

Заканчивая краткий анализ регулярной цикличности колебаний стока рек, следует отметить, что важное значение для выявления цикличности имеет длина исходного стокового ряда. Совершенно ясно, что

циклы большой продолжительности в полном объеме могут быть выявлены при длине ряда, большей, чем их продолжительность.

Циклы же относительно короткие, как правило, более четко выявляются по короткому, но также превышающему продолжительность цикла ряду (см. например, циклы солнечной активности, выявленные по 55-летнему ряду, рис. 1). Однако для уверенного использования необходимо их генетическое обоснование.

Проведенные работы следует отнести к самому начальному этапу изучения связей стока соседних лет, однако уже в настоящее время они позволяют сформулировать ряд важных положений.

ВЫВОДЫ

1. Использование корреляционных функций рядов различных природных процессов весьма полезно как для выявления и изучения регулярной цикличности их колебаний, так и для изучения возможностей описания процесса на основе теории вероятностных процессов.

2. По сравнению с коэффициентами корреляции стока непосредственно смежных лет коэффициенты корреляции стока соседних лет, разделенных промежутком времени $\tau > 1$ года, оказались почти во всех случаях значительно более высокими при весьма близких среднеквадратичных ошибках. Следовательно, нельзя не учитывать влияние связи соседних лет, по крайней мере в тех случаях, когда считается необходимым учитывать связь стока непосредственно смежных лет.

3. Почти всегда наблюдается увеличение размаха колебаний коэффициентов корреляции стока соседних лет вокруг оси абсцисс при увеличении промежутка времени между ними. Это свидетельствует о наличии весьма отдаленных, но довольно сильных связей, которые в ряде случаев можно использовать для оценки возможной водности предстоящего периода.

В настоящее время не представляется возможным наметить, хотя бы приближенно, предел, до которого следует учитывать влияние связи стока соседних лет.

4. В азиатской части СССР наблюдаются тенденции к различной цикличности колебаний стока рек и уровней озер как по продолжительности циклов, так и по силе их проявления. Продолжительность циклов колеблется от 5—6 лет до 8—9; 10—11; 20—21; 25—26 и 82 лет и т. д. Коэффициенты корреляции наиболее четких циклов изменяются от 0,30—0,35 до 0,60—0,70 и более.

5. Использование быстродействующих счетных машин позволяет проводить построение корреляционных функций с малой затратой времени. Так, на машине БЭСМ-2 машинное время для подсчета 50—60 коэффициентов корреляции по 65—80-летнему ряду может быть доведено при серийном расчете до 1 мин и менее.

Энергетический институт
Сибирского отделения АН СССР,
Иркутск

Поступила в редакцию
4/XI 1952

ЛИТЕРАТУРА

1. П. А. Ефимович, Вопросы водохозяйственных расчетов и гидрологии. ОНТИ, 1936.
2. А. В. Шнитников, Изменчивость общей увлажненности материков северного полушария. Зап. геогр. об-ва СССР, т. 16, нов. сер. Изд-во АН СССР, 1957.

3. М. С. Эйгенсон, Очерки физико-географических проявлений солнечной активности. Изд-во Львовского гос. ун-та, 1957.
4. Н. А. Картвелишвили, О математическом описании и методике расчетов регулирования речного стока. Изв. АН СССР, ОТН, № 1, 1956.
5. С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель, Расчет многолетнего регулирования речного стока с учетом коррелятивной связи между стоками смежных лет. Сб. Проблемы регулирования речного стока. Изв. АН СССР, ОТН, № 1, 1956.
6. Vujica M. Vevdjevish, Some general aspects of Fluctuations of annual runoff in the Upper Colorado river basin. Engineerings Reseach Colorado State University, October, 1961.
7. W. Kresser, Moglichkeiten und Voraussetzungen einer langfristigen vor hersage der abflussnenden einers gewassrs. «Hidrol. elorcjezesi konf. Budapest, 1961, Kozl. 4.» Budapest, 1961.
8. Н. В. Смирнов, И. В. Дуини-Барковский, Краткий курс математической статистики для технических приложений. Физматгиз, 1959.
9. Е. С. Вентцель, Теория вероятностей. Физматгиз, 1958.

В. А. ШВАБ, В. А. СМОЛОВИК, А. М. КАПУСТИН,
Г. Г. ГАЙНУТДИНОВ

**ВЫСОКОНАПОРНОЕ
ПНЕВМАТИЧЕСКОЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ
ТОНКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Повышение экономичности пневматического транспорта в значительной степени определяется возможностью повышения расходной концентрации транспортируемого материала, что может быть достигнуто увеличением начальных давлений воздуха. Одновременно при этом существенно расширяются возможности транспортирования тонкодисперсных материалов на значительные расстояния по трубам относительно малых диаметров.

Однако большие перепады давлений при работе высоконапорной пневмотранспортной установки усложняют механизм процесса движения пыле-газовой смеси вследствие сжимаемости потока. Для выявления основных закономерностей движения в этих условиях было проведено экспериментальное исследование на опытной установке, обеспечивающей возможность пневматического транспортирования при достаточно больших перепадах давления, а результаты эксперимента по расходу смеси и общему гидравлическому сопротивлению обобщены на основе некоторых теоретических положений, приведенных ниже.

Эксперименты проводились на специально изготовленной пневмотранспортной установке, общая длина пневматической линии которой составляла 28,2 м, диаметр — 26,5 мм. В ходе опытов значения расходных концентраций могли изменяться в некоторых пределах, соответствующих устойчивому режиму транспортирования без закупорок пневматической

Таблица 1

Название материала	Удельный вес		Крупность по среднему размеру частиц
	насыпной, кг/м ³	истинный, кг/м ³	
Ламповая сажа	105	1640	меньше 1 мк
Молотая сера	312	2010	меньше 20 мк
Молотый каолин	516	2200	меньше 2 мк

линии. Исследования выполнялись с тонкодисперсными сыпучими материалами, применяемыми в качестве наполнителей резины: ламповой сажей, молотой серой и каолином, некоторые характеристики которых приведены в табл. 1.

В результате измерений определялись: расход материала G_m , расход воздуха G_v , давление p_1 и p_2 — в начале и конце пневматической ли-

нии, температура воздуха при входе в пневматическую линию $T^\circ K$. В табл. 2 приводится сводка осредненных по времени опытных данных.

С целью обобщения результатов опытов рассмотрим в теоретическом аспекте закономерности установившегося движения пылевоздушной смеси для осредненных по времени параметров. При значительных изменениях давления процесс сопровождается расширением воздуха и понижением его температуры. Но если дисперсность твердого материала

Таблица 2

Материал	Расход материала G_m , кг/час	Расход воздуха G_v , кг/час	Концентрация материала ρ , кг/кг	Давление во входном сечении P_1 , ата	Скорость воздуха во входном сечении u_1 , м/сек	Отношение скоростей $\kappa = \frac{u}{w}$	Относительный коэффициент сопротивления $\frac{\lambda^* l}{D}$	Безразмерный критерий $\frac{\lambda^* l}{D(1+\rho\kappa)}$
Ламповая сажа	1562	336	4,65	3,82	37,8	0,920	40,3	7,64
	2360	219	10,8	3,32	28,4	0,715	72,6	8,34
	1792	225	7,95	3,16	30,6	0,805	63,0	8,52
	2330	239	9,75	3,55	28,9	0,76	70,7	8,40
	1252	235	5,33	2,79	26,6	0,895	50,2	15,6
	1930	202	9,55	3,60	24,1	0,765	110,8	13,4
	2262	268	8,45	3,77	31,2	0,795	62,7	8,13
	2017	229	9,47	3,69	26,7	0,765	86,5	10,45
	1550	257	6,04	3,16	34,8	0,87	47,6	7,61
	1990	282	7,06	3,32	36,5	0,835	50,2	7,27
Молотая сера	6020	154,5	39,0	3,51	18,9	0,44	169,2	9,30
	6440	138,6	46,5	2,77	21,4	0,41	97,2	4,84
	6180	137,5	45,0	2,97	19,9	0,415	143,2	7,28
	8220	147,0	56,0	3,55	17,7	0,385	189,3	8,60
	6080	158,5	38,4	2,88	23,6	0,445	93,7	5,17
	8400	139,8	60,0	3,50	17,2	0,37	202,0	8,70
	7660	187,0	33,5	3,79	21,2	0,475	128,0	7,57
	Каолин	9148	143,0	64,0	3,75	15,5	0,358	260,0
6050		157,0	38,5	4,11	16,4	0,450	239,0	13,10
6300		164,0	42,3	3,82	16,6	0,432	233,5	12,1

достаточно высока, возникает интенсивный теплообмен между воздухом и твердыми частицами. В связи с этим изменение температуры воздушной среды при значительных концентрациях материала будет существенно ограничиваться. Полагая коэффициент теплоотдачи от воздуха к частицам материала достаточно большим ($\alpha \rightarrow \infty$), можно считать температуру воздуха и дисперсного материала практически одинаковой. В том случае, когда смесь движется по трубе без потерь тепла в окружающую среду, температура ее понижается только за счет расширения газа. Однако этот процесс существенно отклоняется от адиабатического в связи с теплообменом между газом и частицами твердых примесей. Анализ уравнения энергии для потока пылегазовой смеси в предположении равновесного теплового состояния последней показывает, что в данном случае будет иметь место политропический процесс расширения, учитывающий подвод тепла к газу от твердой компоненты смеси, в соответствии с зависимостью

$$T p^{1-n} = \text{const}, \quad (1)$$

где значение показателя политропы

$$n = \frac{c_p + \frac{\mu}{k} C_m}{c_v + \frac{\mu}{k} C_m} \quad (2)$$

Здесь T — температура газа,
 ρ — плотность газа,
 c_p и c_v — соответственно теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме,
 C_m — теплоемкость твердой компоненты смеси,
 $\mu = \frac{G_m}{G_v}$ — коэффициент расходной концентрации материала,
 G_m — весовой расход материала,
 G_v — весовой расход газа,
 k — отношение средней стороны материала w к средней скорости газа u , т. е. $k = \frac{w}{u}$.

Показатель политропы n при больших значениях концентрации μ , как это следует из (2), мало отличается от единицы. На этом основании в условиях пневматического транспорта мелкодисперсного материала с большими концентрациями из равенства (1) при $n=1$ следует

$$T = \text{const} \quad (3)$$

и, следовательно, движение сжимаемой смеси в этом случае можно считать изотермическим.

Уравнение движения пыле-воздушной смеси с учетом потерь на сопротивление в трубе за счет трения газовой и твердой компоненты и влияния силы тяжести будет [1, 2]:

$$c \rho u \frac{du}{dx} + c_m \rho_m w \frac{dw}{dx} + \frac{dp}{dx} + (c_m \rho_m + c \rho) g \sin \alpha + \lambda \frac{u^2}{2D} c \rho + \lambda_1 \frac{w^2}{2D} c_m \rho_m = 0. \quad (4)$$

Здесь w и u — соответственно скорости движения материала и воздуха,
 ρ_m — плотность материала и воздуха,
 p — статическое давление в потоке,
 g — ускорение силы тяжести,
 α — угол наклона трубы к горизонту,
 D — диаметр трубы,
 x — координатная ось, ориентированная в направлении оси трубы,
 λ и λ_1 — соответственно коэффициенты сопротивления трения воздуха и материала,
 c и c_m — объемные концентрации воздуха и материала, причем

$$c = \frac{V}{V + V_m},$$

где V и V_m — объемы газа и материала в данном объеме смеси.

Первые два члена уравнения (4) характеризуют инерционные силы, соответственно для газа и твердой компоненты смеси, четвертый член —

гравитационные силы, и два последних члена определяют соответственно сопротивление в трубе для газовой и твердой составляющих смеси.

Уравнение (4) может быть приведено к следующему виду:

$$\left(1 + \mu \frac{dw}{du}\right) u \frac{du}{dx} + \frac{1}{c \rho} \frac{dp}{dx} \pm \left(1 + \frac{\mu}{k}\right) g \sin \alpha + \lambda^* \frac{u^2}{2D} = 0, \quad (5)$$

где

$$\lambda^* = \lambda \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda} \mu k\right).$$

Знак члена, учитывающего влияние силы тяжести в уравнении (5), будет положительным при восходящем движении и отрицательным при нисходящем.

Уравнения непрерывности для каждой компоненты смеси будут:

$$\frac{\partial}{\partial x} (c u \rho) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (c_m w \rho_m) = 0,$$

или

$$c u \rho = \text{const}, \quad (6)$$

$$c_m w \rho_m = \text{const}. \quad (7)$$

Плотность материала от давления не зависит и поэтому $\rho_m = \text{const}$. Для воздуха имеем

$$\rho = \frac{p}{g R T}. \quad (8)$$

Между объемной концентрацией c и расходной концентрацией материала μ на основании (6) и (7) может быть установлена зависимость

$$c = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{k} \frac{\rho}{\rho_m}}. \quad (9)$$

Система уравнений (5), (6), (7) и (8) определяет движение сжимаемой двухфазной смеси в наклонных трубах с прямолинейной осью.

Принимая во внимание уравнение (6) и соотношение (9) при условии $k = \text{const}$, после дифференцирования получим

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{1}{c} \frac{du}{u}. \quad (10)$$

Критическое значение скорости при изотермическом течении определяется зависимостью

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho} = g R T. \quad (11)$$

Учитывая (10) и (11), уравнение движения (5) приведем к такой форме:

$$\left(1 + \mu \frac{dw}{du}\right) u du - \frac{a^2}{c^2} \frac{du}{u} \pm \left(1 + \frac{\mu}{k}\right) g \sin \alpha dx + \lambda^* \frac{u^2}{2D} dx = 0. \quad (12)_a$$

Значение отношения скорости движения материала к скорости воздуха $\frac{w}{u}$ определяется свойствами материала и сопротивлением трения на стенках трубы при заданном режиме движения. Для определенного случая движения в пределах всей длины пневматической линии значение $\frac{w}{u}$ с достаточной точностью можно считать величиной постоянной, т. е. не зависящей от координаты x . В этом случае будем иметь

$$\frac{w}{u} = k = \text{const}$$

и, следовательно,

$$\frac{dw}{du} = \frac{w}{u} = k.$$

Из уравнения (12) в результате разделения переменных получим

$$\int_{x_1}^x dx = \int_{z_1}^z \frac{\left[\frac{a^2}{c^2} - (1 + \mu k) z \right] dz}{\frac{\lambda^*}{D} z [z \pm b]}, \quad (13)$$

где введено обозначение $z = u^2$ и

$$b = \frac{2gD}{\lambda^*} \left(1 + \frac{\mu}{k} \right) \sin \alpha.$$

В дальнейшем будем считать значение c величиной постоянной и равной среднему значению концентрации по длине трубы, которая определяется зависимостью (при $\bar{\rho} = \sqrt{\rho_1 \rho_2}$)

$$\bar{c} = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{k} \frac{\rho_1}{\rho_m} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}},$$

где ρ^2 — плотность воздуха в выходном сечении трубы и ρ_1 — плотность воздуха во входном сечении. Используя уравнение состояния (8), найдем

$$\bar{c} = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{k} \frac{p_1}{RT \rho_m} \sqrt{\frac{p_2}{p_1}}}. \quad (14)$$

В этом предположении интегрирование уравнения (13) дает

$$\frac{\lambda^*}{D} (x - x_1) = - \left[\pm \frac{a^2}{b c^2} + (1 + \mu k) \right] \ln \frac{z \pm b}{z_1 \pm b} \pm \frac{a^2}{b c^2} \ln \frac{z}{z_1}. \quad (15)$$

В частном случае для горизонтальных труб, когда $\alpha = 0$, уравнение (12) упрощается

$$(1 + \mu k) u du - \frac{a^2}{c^2} \frac{du}{u} + \lambda^* \frac{u^2}{2D} dx = 0. \quad (16)$$

Интегрирование этого уравнения с разделяющимися переменными приведет к выражению

$$\frac{\lambda^* l}{D} = \frac{\lambda^*}{D} (x - x_1) = \frac{a^2}{u_1^2 c^2} \left[1 - \frac{u_1^2}{u^2} \right] - (1 + \mu k) \ln \frac{u^2}{u_1^2}. \quad (17)$$

Исследование уравнения (17) показывает, что величина $\frac{\lambda^*}{D} (x - x_1)$ достигает при некотором значении $\frac{u_1}{u}$ своего максимального значения. Для определения значения $u \left[\frac{\lambda^*}{D} (x - x_1) \right]_{\text{max}}$ продифференцируем равенство (17) по $\frac{u_1}{u}$, тогда

$$\frac{d \left[\frac{\lambda^*}{D} (x - x_1) \right]}{d \left(\frac{u_1}{u} \right)} = - 2 \frac{a^2}{u_1^2 c^2} \cdot \frac{u_1}{u} + \frac{2(1 + \mu k)}{\left(\frac{u_1}{u} \right)}.$$

Приравнявая это выражение нулю, получим

$$- \frac{a^2}{u_1^2 c^2} \left(\frac{u_1}{u} \right)^2 + (1 + \mu k) = 0.$$

Отсюда $\left(\frac{u_1}{u} \right)_{\text{max}}$, соответствующее максимальному значению $\left[\frac{\lambda^*}{D} (x - x_1) \right]_{\text{max}}$, будет

$$\left(\frac{u_1}{u} \right)_{\text{max}} = \frac{\bar{c} \sqrt{1 + \mu k}}{\left(\frac{a}{u_1} \right)}. \quad (18)$$

При некоторой заданной концентрации материала и заданном отношении давлений $\frac{p_1}{p_2}$ устанавливается определенный максимальный режим, характеризующийся наибольшим возможным расходом воздуха. Из равенства (18) может быть определена относительная, максимально возможная скорость входа в трубу

$$\frac{u_1}{a} = \frac{\left(\frac{u_1}{u} \right)_{\text{max}}}{\bar{c} \sqrt{1 + \mu k}}. \quad (19)$$

Имея в виду, что при среднем значении концентрации \bar{c} для изотермического потока будет иметь место соотношение

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{p_2}{p_1}, \quad (20)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют входному и выходному сечениям трубы,

$$\frac{u_1}{a} = \frac{p_2}{\bar{c} \sqrt{1 + \mu k}}. \quad (21)$$

При постоянном значении противодействия p_2 на выходе расход воздуха выражается зависимостью

$$G_n = u_1 F \rho_1 g \bar{c} = \frac{p_2 E}{RT} \sqrt{\frac{a^2}{1 + \mu k}}, \quad (22)$$

а, учитывая (11), найдем

$$G_n = \frac{p_2 F \sqrt{\frac{g}{RT}}}{\sqrt{1 + \mu k}}. \quad (23)$$

Зависимость (23) может быть использована и для всего контура пневматической линии, если влияние вертикальных участков оказывается сравнительно слабым. На рис. 1 приведены опытные значения расхо-

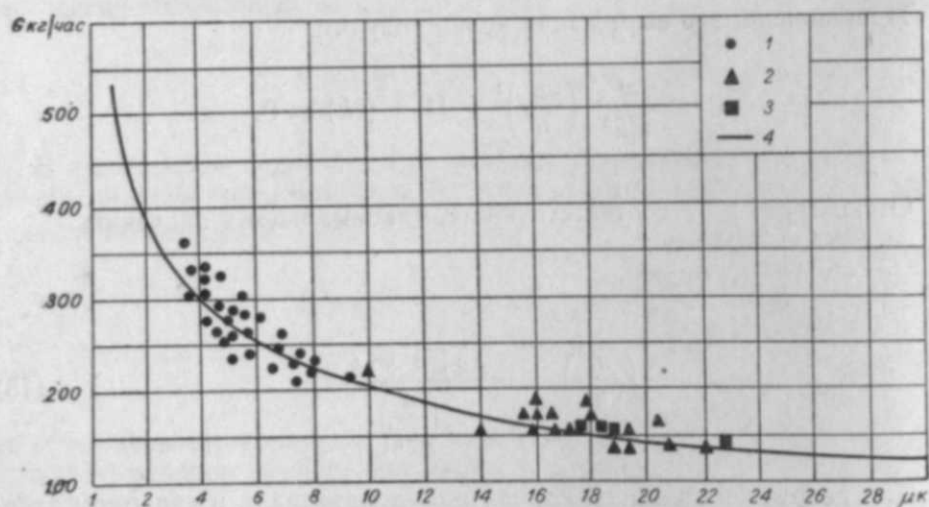


Рис. 1. Кривая зависимости $G_n = f(\mu k)$:

1 — ламповая сажа, 2 — молотая сера, 3 — каолин, 4 — теоретическая кривая.

дов воздуха при транспортировании материала, там же приведена теоретическая зависимость (23). Достигнутое соответствие опытных значений расходов с теоретической зависимостью (23) установлено по средним значениям k , полученным опытным путем для каждого из исследованных материалов в виде зависимости k от μ , причем для сажи при $\mu = 5 \div 10$ имеем $k = 0,7 \div 0,9$ и для серы и каолина при $\mu = 30 \div 60$, $k = 0,35 \div 0,5$.

лученная выше зависимость (21) позволяет определить гидравлическое сопротивление при движении смеси по уравнению (17) в зависимости от отношения $\frac{p_1}{p_2}$

$$\frac{\lambda^* l}{D} = (1 + \mu k) \left[\frac{1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2} - 2 \ln \left(\frac{p_1}{p_2}\right) \right] \quad (24)$$

или

$$\frac{\lambda^* l}{(1 + \mu k) D} = \left[\frac{1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2} - 2 \ln \left(\frac{p_1}{p_2}\right) \right]. \quad (25)$$

Эта зависимость в условиях пневматического транспортирования сжатым воздухом получает более конкретный смысл, поскольку расход воздуха при движении смеси интерпретируется как предельный (критический).

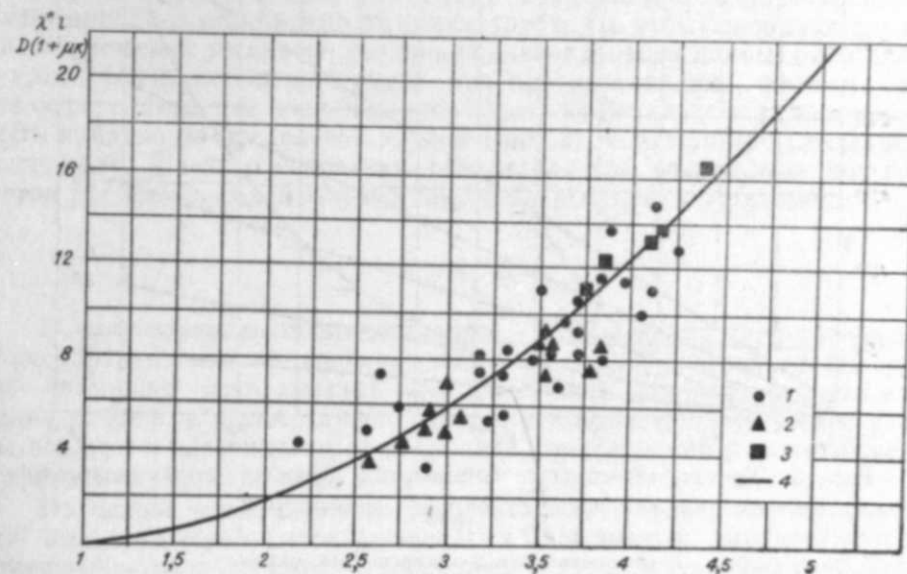


Рис. 2. Кривая обобщенной зависимости сопротивления $\frac{\lambda^* l}{D(1 + \mu k)} = f\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$ для пневматической линии:

1 — ламповая сажа, 2 — молотая сера, 3 — каолин, 4 — теоретическая кривая.

Графическое изображение зависимости (25) в безразмерных координатах $\frac{\lambda^* l}{(1 + \mu k) D}$ и $\frac{p_1}{p_2}$ приводится на рис. 2 в сопоставлении с опытными значениями этих критериев, полученных на экспериментальном стенде пневматической линии для всех исследованных материалов. Из графика (рис. 2) следует, что опытные данные подтверждают характер теоретической зависимости и, в частности, линейный характер зависимости сопротивления трения от расходной концентрации материала μ при некотором постоянном отношении давлений $\frac{p_1}{p_2}$. Величина коэффициента сопротивления для прямых горизонтальных пневматических линий λ^* может быть определена по графику (рис. 2) при значении эквивалентного отношения

$\frac{l}{D} = 1310$. Здесь эквивалентная длина l выбрана больше геометрической из соображений, учитывающих влияние местных сопротивлений опытной установки, и представляет собой длину равноценного по сопротивлению горизонтального трубопровода. Следует, однако, отметить, что полученные таким образом значения λ^* при больших концентрациях будут несколько выше их истинных значений вследствие увеличения эквивалентной длины с ростом концентрации.

С энергетической точки зрения наиболее выгодные режимы движения смеси будут иметь место при наиболее высоких расходных концентрациях материала. Однако практически возможность увеличения кон-

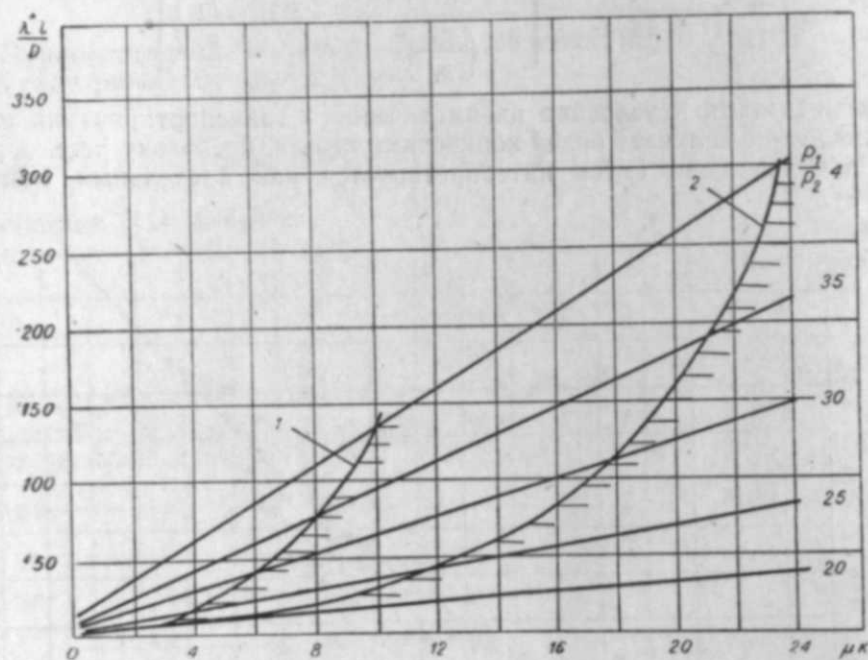


Рис. 3. Кривая зависимости оптимальных режимов в координатах $\frac{\lambda^* l}{D} = f(\mu k)$:

1 — ламповая сажа, 2 — молотая сера, каолин.

центраций ограничивается тем пределом, при котором устойчивость движения становится недостаточной и появляется возможность закупорок трубопровода. На основании проведенного исследования могут быть указаны предельные режимы наиболее высоких концентраций смеси, при которых экспериментальная установка имела длительно устойчивый режим работы при различных начальных давлениях для каждого из исследованных материалов. На рис. 3 приведен график зависимости $\frac{\lambda^* l}{D} = f(\mu k)$ для эквивалентных горизонтальных пневматических линий, на котором нанесены кривые оптимальных режимов пневматического транспорта для исследованных материалов. Область, лежащая правее каждой кривой, хотя и соответствует более напряженным режимам работы установки, в то же время может иметь неустойчивый характер с возникающими закупорками транспортирующей линии, а область левее этой кривой будет соответствовать устойчивым, но менее напряженным и поэтому менее выгодным режимам. Использование этих графиков позво-

ляет указать наиболее целесообразные режимы и определить для них коэффициент сопротивления. Особое значение предельные кривые имеют при проектировании новых пневматических линий, так как позволяют определить для них соответствующее значение коэффициента сопротивления. Такая возможность вытекает из того соображения, что при заданных отношениях давлений расход смеси определяется лишь расходной концентрацией материала по зависимости (19), которой соответствует определенное значение коэффициента сопротивления λ^* по (25), сохраняющее при изотермическом движении смеси некоторое среднее, но постоянное значение на всей приведенной длине транспортирующей магистрали. В обычном случае истечение смеси осуществляется в сепаратор, где давление практически можно считать равным атмосферному, и поэтому критический расход воздуха будет всегда определяться только концентрацией материала и не будет зависеть от длины транспортирующей линии, при этом, однако, большим эквивалентным длинам транспортирующей линии отвечают большие значения отношения $\frac{P_1}{P_2}$. Таким образом, при одинаковых расходах смеси при заданном сечении трубы и противодавлении в одну атмосферу коэффициент сопротивления λ^* будет одинаков независимо от длины трубы. На этом основании для всех пневматических установок различной эквивалентной длины, работающих с критическим истечением смеси при противодавлении, равном одной атмосфере, значение коэффициента λ^* для оптимального режима может быть найдено по предельной кривой (рис. 3), соответствующей данному материалу. На этом основании представляется возможным построить метод расчета высоконапорных пневмотранспортных установок.

ВЫВОДЫ

В результате экспериментального исследования пневматического транспортирования тонкодисперсных материалов (заполнителей резины — ламповой сажи, молотой серы и каолина), при существенном изменении плотности пылевоздушной смеси, установлены критические расходы воздуха в зависимости от расходной концентрации μ и значение коэффициента сопротивления λ^* .

На основе приближенного теоретического анализа потока сжимаемой пылевоздушной смеси установлены зависимости, характеризующие критические расходы смеси и сопротивления горизонтальных труб. Теоретические выводы явились основой обобщения опытных данных, полученных на экспериментальной пневматической линии.

В итоге исследования установлены предельные режимы с наиболее высокими расходными концентрациями материала, отвечающие наибольшей экономичности транспортирования без опасности закупорок труб. Результаты исследования могут служить основой для построения расчета установок высоконапорного пневматического транспорта тонкодисперсных материалов.

Томское отделение Омского института инженеров железнодорожного транспорта

Поступила в редакцию 27/VII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Слезкин. Докл. АН СССР, т. 86, № 2, 1952.
2. В. А. Шваб. Тр. МИИТа, вып. 139. Первая межвузовск. конф. 1961.
3. К. И. Страхович. Прикладная газодинамика, ОНТИ, 1937.

С. А. БАБЕНКО

**ФЛОТАЦИЯ ИЛЬМЕНИТА ИЗ ПЕСКОВ,
СОДЕРЖАЩИХ ГУМИНОВЫЕ ВЕЩЕСТВА***

Гуминовые вещества в отличие от распространенных в практике флотации коллоидов (крахмала, таннина, клея и карбоксиметилцеллюлозы) не являются намеренно вводимыми в пульпу реагентами, а сопутствуют поступающим на флотацию минералам или воде.

Специальных исследований о влиянии гуминовых веществ на флотацию не проводилось. Имеются заключения [1, 2] о том, что гуминовые вещества являются лиофильными коллоидами, в присутствии которых флотационный процесс совершаться не может. Д. С. Емельянов [3] трудную флотируемость окисленных углей и отсутствие флотации у бурых углей объясняет содержанием в них повышенных количеств гуминовых кислот. С депрессирующим влиянием гуминовых веществ на флотацию рудных минералов одного из россыпных месторождений Сибири столкнулись и мы при разработке технологии их обогащения.

Пески, на которых проводились опыты по флотации ильменита, темно-серого цвета, тонкозернистые, рыхлые, кварцевые, со значительным (14%) содержанием каолинового материала. Большая часть тяжелых минералов, в том числе и ильменит, имеет крупность 0,1—0,025 мм. Для опытов по флотации брался класс 0,25+0,02 мм, тщательно отмытый от глины и содержащий 2,60% двуокиси титана. Все опыты проводились на флотомашинке с емкостью камеры 300 см³; скорость вращения импеллера 2100 об/мин; при флотации Т : Ж=1 : 2, вода водопроводная, температура воды 18°С, расход соды 1 кг/т, время агитации 5 мин., время флотации 3 мин., рН=8,2.

Непосредственная флотация отмытого от глины песка и флотация с предварительной его обтиркой дали отрицательные результаты. Выход пенного продукта не превышал 0,5—0,7%, извлечение ильменита в концентрат составляло около 1%. Многократная протирка и промывка песка и увеличение расхода собирателя существенно не улучшили флотируемость ильменита. Причиной депрессии ильменита являются гуминовые вещества, окрашивающие жидкую фазу пульпы в бурый цвет.

Выбор способа восстановления флотационных свойств ильменита, депрессированного гуминовыми веществами, начат нами с качественного и количественного определения этих веществ и установления связи их с ильменитом. В настоящее время методы изучения рассеянных органических веществ осадочных пород достаточно определены [4].

Битум извлекался спорто-бензольной смесью, гуминовые кислоты — 2%-ным раствором КОН при нагревании до 60°С. Количественное определение гуминовых кислот осуществлялось колориметрическим способом. Общее содержание органического вещества оценивалось по количеству органического углерода на сухую массу навески. Для определения С нами применен метод сухого сжигания в токе кислорода. Определение

* В работе принимали участие А. Ф. Плешкова, Ф. Г. Прокопьева и Г. А. Червечук.

групп органического вещества проводилось отдельно для глинистой и песковой частей пробы, а также для чистого ильменита, выделенного на концентрационном столе и магнитном сепараторе при силе тока 0,75 а. Чтобы иметь представление о распределении органических веществ меж-

Таблица 1

Органическое вещество исследуемой пробы

Наименование пробы	С _{орг.} , % на сухую массу	Содержание в процентах от общего количества С _{орг.}		
		битумы	гуминовые кислоты	остаточное (нерастворимое) орг. вещество
Песок (-0,1+0,02 мм)	0,4	3,2	75,4	21,4
Глина (-0,02 мм)	3,55	6,6	78,6	14,8
Ильменит (-0,1+0,02 мм)	2,35	5,6	82,8	11,6

ду песковыми и ильменитовыми фракциями, последние брались одного класса крупности (0,1—0,02 мм).

Ильменитовый продукт содержал 97% ильменита, 0,8% полевых шпатов, биотита и кварца, 1,1% лейкоксена и около 1% циркона. Для удаления возможных лигнитизированных примесей из навески ильменитов она помещалась в тяжелую жидкость уд. веса 2,8, а затем тщательно промывалась дистиллированной водой. Результаты определения групп органических веществ, приведенные в табл. 1, говорят о преобладании в анализируемом материале гуминовых кислот, что дает право отнести органическое вещество, находящееся в россыпи, к слабосостановленному, малометаморфизованному органическому веществу гумусовой природы. Для ильменита характерно повышенное содержание органического углерода, в том числе углерода гуминовых кислот.

При извлечении органического вещества щелочью или смесью растворителей с поверхности ильменита отделяется пленка, которая переходит в раствор в виде тонкого шлама. Химический и термографический анализы материала пленки говорят о его каолиновом составе. Глинистая пленка может быть частично снята с поверхности минералов путем обтирки в плотной пульпе при Т : Ж=1 : 1. Последовательные обтирки одной пробы ильменита и химический анализ отделившегося шлама показали, что содержание окислов кремния и алюминия, характерных для каолина, убывает в шламе постепенно (табл. 2) с 31,04% и 25,41% (1-я обтирка) до 19,48% и 12,43% (4-я обтирка). Тщательная отмывка водой ильменитовой фракции перед опытами и значительное содержание SiO₂ и Al₂O₃ в шламе 4-й обтирки исключают возможность принятия каолина, не связанного с поверхностью минералов, за глинистую пленку.

Таблица 2

Химический анализ шлама, полученного путем последовательных обтирок ильменитовой фракции

№ обтирки	Содержание в процентах				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	п.п.п.
1	31,04	25,41	0,32	0,72	10,28
2	26,12	19,29	0,25	0,79	10,44
3	21,00	14,49	0,21	0,79	11,38
4	19,48	12,43	0,18	0,56	10,45

Под микроскопом на зернах ильменита пленка обычно не видна, ее хорошо можно наблюдать после окрашивания метиленовым голубым красителем. Так как в составе вещества пленки преобладает каолинит, она хорошо окрашивается в фиолетовый цвет, и тогда видно, что пленка не представляет сплошную оболочку, а располагается в углублениях и других неровностях на зернах ильменита.

Флотацию ильменита оленовой кислотой и ее заменителями ведут в щелочной среде, которая растворяет гуминовые кислоты, составляющие основу органического вещества, найденного нами в исследуемой пробе. Отделившиеся при этом глинистые частицы (илы) будут переходить в пульпу, чему способствует ее перемешивание.

Таблица 3

Влияние гуминовых веществ и ила на флотацию ильменита

Количество илов и гуминовых веществ в пульпе	Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %	Извлечение, %
2,5 г/л, илы	концентрат	6,7	36,1	93,0
	хвосты	93,3	0,18	7,0
	песок -0,25+0,02	100	2,58	100
40 мг/л, гуминовые вещества	концентрат	6,0	39,8	93,7
	хвосты	94,0	0,18	6,3
	песок -0,25+0,02	100	2,66	100
80 мг/л, гуминовые вещества	концентрат	7,1	28,2	77,9
	хвосты	92,9	0,61	22,1
	песок -0,25+0,02	100	2,57	100
2,5 г/л (илы) + 80 мг/л (гуминовые вещества)	концентрат	7,4	23,4	63,8
	хвосты	92,6	1,1	36,2
	песок -0,25+0,02	100	2,79	100

Предполагая, что депрессия ильменита вызывается находящимися в пульпе гуминовым веществом и илом, мы провели опыты по выяснению влияния последних на процесс флотации. Предварительно определялось количество перешедших в жидкую фазу гуминовых веществ и ила при агитации пульпы с содой (расход 1 кг/т). Затем на чистом от органических веществ песке проводилась флотация с добавлением определенного ранее количества гуминовых веществ и ила. Анализ жидкой фазы пульпы показал, что в момент подачи собирателя, при разных способах подготовки песка к флотации, в пульпе содержится 40—78 мг/л гуминовых веществ и 1,1—2,3 г/л ила. Эти примеси не влияют отрицательно на флотацию ильменита (табл. 3) из песков, близких по гранулометрическому и минералогическому составу исследуемым, но чистым от органических веществ. При добавлении в пульпу 40 мг/л гуминовых веществ или 2,5 г/л ила выход концентрата составляет 6,0—6,7%, извлечение TiO_2 в концентрат 93,7—93,0%. Увеличение количества гуминовых веществ в пульпе до 80 мг/л, а также нахождение их в смеси с илами уменьшает извлечение ильменита в концентрат за счет ухудшения селективности, однако

результаты флотации ильменита получились гораздо лучше, чем из песков, содержащих гуминовые вещества в естественном виде, когда выход пенного продукта был 0,7%, а извлечение в концентрат TiO_2 составляло 1,1%.

Таким образом, существующие в настоящее время способы подготовки песка к флотации не обеспечивают надлежащего удаления с поверхности минералов гуминовых веществ и ила, что и вызывает депрессию ильменита.

Для улучшения очистки минералов от глинистых пленок, адсорбированных гуминовых веществ, применялась обтирка песка в щелочной среде. Условия обтирки: Т : Ж = 1 : 1, время обтирки 10 мин. После обтирки пески промывались в воде и подвергались флотации при вышеприведенных условиях. В сливе песков после их обтирки в промывных водах определялось количество гуминовых веществ и илов, которые затем анализировались на содержание С (табл. 4).

Принимая содержание углерода в гуминовых веществах равным 60%, а в исходных песках — 0,4%, мы рассчитывали суммарное количество органического углерода, удаленного в процессе обтирки и поступающего на флотацию песков (загружалось во флотомашину по 127 г).

С увеличением расхода соды при обтирке увеличивается переход в жидкую фазу гуминовых веществ, и при расходе соды 2 кг/т он достигает 19,6 мг. Сода способствует лучшей очистке минералов и от глинистых частиц. При обтирке без соды в жидкую фазу перешло 0,39 г ила, а при расходах соды 0,25 и 0,5 кг/т соответственно 0,68 и 0,86 г. Дальнейшее повышение расхода соды влияет на выход ила незначительно.

При переходе в жидкую фазу 0,86 г (0,67%) илов наступает восстановление флотационных свойств ильменита, извлечение которого в пенный продукт составляет 93,6%.

Общее количество удаленных органических веществ в пересчете на $S_{орг}$ при этом равно 28,2 мг, или 5,5% от всего органического вещества пескового материала, направляемого на флотацию.

Аналогичные результаты по восстановлению флотационных свойств ильменита получены с применением едкого натра при обтирке. При его расходе 0,25 кг/т удаляется 29 мг $S_{орг}$, или 5,8%.

ВЫВОДЫ

1. Геохимической особенностью изучаемых песков является повышенное содержание органического углерода, в том числе углерода гуминовых веществ, на зернах ильменита.

2. Депрессия исследуемых ильменитов при флотации петролатумом вызывается гуминовыми веществами и глинистой пленкой, термографический и химический анализы которой говорят о ее каолинитовом составе.

3. Для восстановления флотиремости ильменита, содержащего гуминовые вещества, необходимо проводить обтирку в щелочной среде.

Таблица 4

Очистка песков от органических веществ и ее влияние на флотацию ильменита

Кодич соды при обтирке, кг/т	Удалено в процессе обтирки				Процент удаления $S_{орг}$	Извлечение ильменита в концентрат
	илы	$S_{орг}$ илов, %	гуминов. вещества, мг	$S_{орг}$ всего, мг		
—	0,39	2,8	2,7	12,6	2,5	1,1
0,25	0,68	2,5	8,3	22,0	4,3	25,0
0,5	0,86	2,5	10,4	28,2	5,5	93,6
1,0	0,87	2,2	13,7	27,2	5,3	94,1
2,0	0,91	2,1	19,6	30,8	6,0	9,5

При содержании в песках 0,4% органического углерода расход 0,5 кг/т соды или 0,25 кг/т едкого натра обеспечивает удаление 5,5—5,8% органических веществ, содержащихся в песковой фракции.

Томский политехнический институт

Поступила в редакцию
27/VII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. С. Емельянов, О характеристике углей как объектов флотационного обогащения. Тр. Харьковск. горн. ин-та, т. 3, 1956.
2. Э. В. Майер, Г. Шранц, Флотация. М., Цветметиздат, 1933.
3. Методы изучения осадочных пород. Т. 2. М., Госгеолтехиздат, 1957.
4. Ф. Г. Мозес, Коллоиды и флотация. Сб. трудов американских авторов. М., Цветметиздат, 1932.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Г. С. ЗИНОВЬЕВ, А. Г. ЛОПАТИН, А. И. ТРУБЕЦКОЙ

ГЕНЕРАТОР НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Большинство современных экспериментальных установок имеет схемы для генерирования различного рода электрических импульсов. Оформленные в виде самостоятельных блоков эти схемы являются необходимыми инструментами для наладки и испытания измерительных устройств ядерной электроники. В настоящей статье приводятся краткое описание и расчет генератора наносекундных импульсов, выполненного на туннельных диодах и полупроводниковом триоде.

Разработанный генератор состоит из следующих основных частей: задающего каскада, схемы формирования импульса и усилителя.

Задающий каскад представляет собой мультивибратор на туннельном диоде TD_1 (рис. 1). Для обеспечения режима автоколебаний рабочая точка E по постоянному

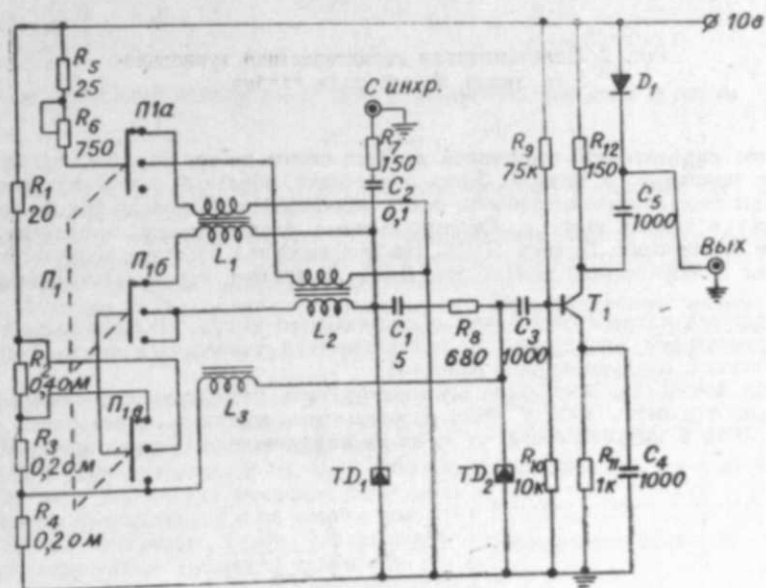


Рис. 1. Принципиальная схема генератора.

току задана на участке отрицательного сопротивления вольтамперной характеристики туннельного диода, как показано на рис. 2. В схеме возникают колебания по циклу БВГД, причем на участках БВ и ГД вольтамперной характеристики формируются фронты выходных импульсов, а на участках ВГ и ДБ отрабатываются части медленного изменения выходного напряжения. Частота следования определяется величиной хронизирующей индуктивности L_1 или L_2 соответственно на первом или втором диапазоне частоты. Для обеспечения возможности плавного изменения частоты индуктивности L_1 и L_2 имеют обмотки подмагничивания, при изменении тока в которых меняется величина основной индуктивности. Через платы Π_{1a} и $\Pi_{1б}$ переключателя Π_1 осуществляется

соответствующая коммутация катушек на двух диапазонах. Третье положение переключателя используется для перевода задающего каскада в ждущий режим, необходимый при внешнем запуске. Через плату $\Pi_{1,6}$ переключателя осуществляется задание необходимого режима по постоянному току на диод TD_1 . Малое выходное сопротивление источника обеспечено использованием низкоомного делителя R_1-R_4 . Через цепочку R_7C_2 производится синхронизация частоты генератора при его работе в автоколебательном режиме или внешний запуск при работе в ждущем режиме.

Схема формирования импульса выполнена в виде ждущего мультивибратора на туннельном диоде TD_2 . В состоянии покоя его режим определяется положением рабочей точки A на рис. 2. Запускающий импульс от задающего каскада через дифференцирующую цепочку C_1R_3 опрокидывает ждущий мультивибратор во временно устойчивое состояние на участке $BГ$ вольтамперной характеристики туннельного диода. Энергия, накопленная в индуктивности L_3 , начинает рассеиваться и ток через диод падает

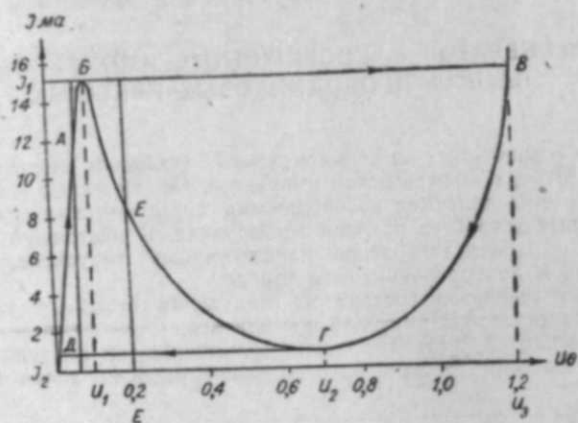


Рис. 2. Вольтамперная характеристика туннельного диода из арсенида галлия.

со скоростью, определяемой постоянной времени схемы до тех пор, пока не будет достигнут ток минимума в точке G . Здесь происходит обратный скачок на участок DB , где в стадии восстановления рабочая точка поднимается до положения A , после чего схема готова к новому запуску. Сформированные отрицательные импульсы подаются на базу транзистора T_1 типа П-418. На коллекторной нагрузке получается выходной импульс положительной полярности. Диод D_1 срезает отрицательный выброс импульса.

Для расчета частоты следования и длительности импульсов были выведены формулы с применением аппроксимации характеристики туннельного диода кусочно-степенной функцией, предложенной в работе [1].

Период следования импульсов мультивибратора определим как сумму длительности импульса и паузы между ними. Длительность импульса будет равна времени изменения тока в индуктивности от I_1 до I_2 на участке $BГ$ вольтамперной характеристики

$$t_n = L \int_{I_2}^{I_1} \frac{di}{U_L} = L \int_{I_2}^{I_1} \frac{di}{U_{TD} - E} \quad (1)$$

Выражение для напряжения на туннельном диоде можно получить из функции, которой аппроксимируется характеристика туннельного диода:

$$i = I_1 \left[1 - \left(1 - \frac{U}{U_1} \right)^2 \right] \quad -U_1 < U < U_1, \quad (2)$$

$$i = (I_1 - I_2) \cdot \left| \frac{U - U_2}{U_3 - U_2} \right| + I_2 \quad U_1 < U < U_2. \quad (3)$$

Выражая из (3) напряжение как функцию тока и подставляя в (1), получаем

$$t_n = L \int_{I_2}^{I_1} \frac{di}{(U_3 - U_2) \cdot \left| \frac{i - I_2}{I_1 - I_2} \right|^{1/2} + U_2 - E} \quad (4)$$

Для туннельных диодов из арсенида галлия, используемых в генераторе, γ было близко к трем, поэтому в дальнейших расчетах принято $\gamma = 3$. Все необходимые параметры туннельного диода определяются по характеристике, приведенной на рис. 2.

Произведя интегрирование, найдем выражение для t_n

$$t_n = 3L \frac{I_1 - I_2}{U_3 - U_2} \left[0,5 - \frac{U_2 - E}{U_3 - U_2} + \left(\frac{U_2 - E}{U_3 - U_2} \right)^2 \ln \left| 1 + \frac{U_1 - U_2}{U_2 - E} \right| \right]. \quad (5)$$

Длительность паузы определится временем изменения тока в индуктивности от I_2 до I_1 на участке DB вольтамперной характеристики. Напряжение на туннельном диоде найдем из уравнения (2)

$$t_n = L \int_{I_2}^{I_1} \frac{di}{U_L} = L \int_{I_2}^{I_1} \frac{di}{E - U_{TD}} = L \int_{I_2}^{I_1} \frac{di}{E - U_1 + U_1 \left(\frac{I_1 - i}{I_1} \right)^{1/2}} \quad (6)$$

После интегрирования получим

$$t_n = 2L \frac{I_1}{U_1} \left[- \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1} \right)^{1/2} + \frac{E - U_1}{U_1} \ln \left| 1 + \frac{U_1}{E - U_1} \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1} \right)^{1/2} \right| \right]. \quad (7)$$

Период колебаний найдем сложением длительности импульса и паузы

$$T = t_n + t_n.$$

При этом предполагается, что длительность фронтов выходных импульсов мала по сравнению с периодом следования.

Длительность импульса ждущего мультивибратора может быть рассчитана по формуле (5) для случая, когда рабочая точка находится на участке DB , или по формуле (7) для рабочей точки, выбранной на участке $BГ$ вольтамперной характеристики туннельного диода в предположении, что внутренним сопротивлением источника напряжения можно пренебречь.

Генератор, рассчитанный по предложенной методике, имел выходной импульс длительностью 10 нсек при частоте повторения, плавно регулируемой в двух диапазонах: 100 кГц–2000 кГц, 2 мГц–20 мГц. Амплитуда выходных импульсов 6 в на первом диапазоне и 4 в на втором при нагрузке 150 ом. Генератор может синхронизироваться или запускаться внешними сигналами. Катушки индуктивности L_1 , L_2 и L_3 выполнены на ферритовых тороидальных сердечниках $\varnothing 2000$, $\varnothing 600$ и $\varnothing 100$ соответственно. Количество витков катушек приводится в таблице.

Следует отметить, что минимальная длительность импульса и максимальная частота следования ограничиваются не задающими туннельными диодами, а полупроводниковым триодом. Дальнейшее повышение частоты повторения требовало уменьшения длительности импульса, что трудно было проконтролировать из-за отсутствия чувствительного широкополосного осциллографа. В качестве индикатора использовался осциллограф типа С1-11. Регулировка длительности импульса в большую сторону может быть осуществлена путем изменения индуктивности L_3 с помощью тока подмагничивания в дополнительной обмотке, как это сделано с ин-

Конструктивные данные катушек индуктивности

Катушка	L_1	L_2	L_3
Обмотка			
Основная	30	4	4
Подмагничивания	50	50	—

Примечание. Основные обмотки намотаны проводом ПЭЛ 0,2; обмотки подмагничивания — проводом ПЭЛ 0,5.

дуктивностями L_1 и L_2 . Генератор выполнен в коаксиальном оформлении. Питание генератора осуществляется от полупроводникового стабилизатора напряжения. Расчетные параметры отличались менее чем на 10% от величин, полученных экспериментально. В ранее опубликованной работе [2] расчет сделан из условия аппроксимации характеристик туннельного диода кусочно-степенной функцией. При этом экспериментальные результаты отличаются от расчетных примерно на 25%.

Институт радиофизики и электроники
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
27/XII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Н. Кононов, А. С. Сидоров, Туннельные диоды и их применение в триггерах. В сб. «Полупроводниковые приборы и их применение» под ред. А. А. Федотова, вып. 7, Изд-во «Сов. радио», 1962.
2. C. D. Todd, A tunnel diode monostable multivibrator. Semiconductor Products, December, 1960, pp. 27—34.

И. И. КАПРАЛОВ

К ВОПРОСУ О ВОЗБУЖДЕНИИ ДУГИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПЯЖЕНИЯ

Ранее уже сообщалось* о возможности управления моментом зажигания низковольтной дуги отрицательными импульсами напряжения. Управление дугой исследовалось только для одного значения давления аргона с помощью опытной модели экранированного тиратрона. Прибор работал в режиме ждущего релаксационного генератора. Его предпусковой режим определялся амплитудой напряжения и минимальной длительностью возбуждающего импульса, поданного в цепь нитевидного электрода. Этот эксперимент, облегчив понимание некоторых сторон механизма формирования дуги при наличии вспомогательного разряда, в то же время выявил необходимость более широкой постановки исследований.

Большой теоретический и практический интерес представляют собой систематические данные о возбуждении дуги сеточными импульсами различной полярности для широкого рабочего интервала давлений газа.

Для точной постановки эксперимента необходимо испытать более простой опытный прибор с длинной нитью. Это даст возможность в широких пределах изменять положение вспомогательного разряда и точнее определить его роль в процессе зажигания дуги.

Методика исследования

1. Для исследования использовалась опытная ртутная экранированная газоразрядная лампа с накаливаемым катодом (рис. 1). Проницаемость сетки S равна приблизительно 1,5%. Дежурный разряд создается между катодом и молибденовой нитью, имеющей диаметр 80 мк.

Лампа помещалась в масляную ванну. Температура масла регулировалась в пределах 20—60°С. Изменение температуры баллона приводило к изменению давления паров ртути в лампе. Поджигающие импульсы частотой 270 гц подавались на сетку C от генератора ГИ-3М. Генератор обеспечивал подачу

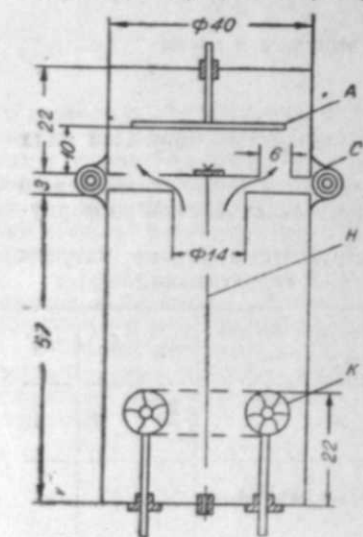


Рис. 1. Схема конструкции опытного прибора:

A — анод; K — накаливаемый катод; C — сетка; H — нитевидный поджигатель. Стрелками показан путь разряда.

* Изв. Сиб. отд. АН СССР, 1960, № 7, 123.

отрицательных (или положительных) импульсов до 80 в ступенями через 2 дб. Длительность импульсов изменялась в пределах 3—10 мксек. Время нарастания и спада импульсов не превышало 0,015 мксек.

2. Управляющие импульсы от генератора через конденсатор емкостью 4300 пф подавались на сетку C . Газоразрядная лампа ставилась в режим ждущего релаксационного генератора. Критерием поджигания являлось отсутствие пропусков возникновения дуги, которые наблюдались на экране осциллографа ЭО-58. Время зажигания разряда на анод определялось по минимальной длительности положительных поджигающих сеточных импульсов, обеспечивающих стабильное зажигание.

Главная дуга при подаче минимальной длительности отрицательных импульсов возникает после окончания действия импульса, и время ее формирования определяется временем, необходимым для достижения критического значения допускового анодного тока (предпусковой ток), и временем пробоя газа. Минимальная длительность импульса при стабильном зажигании равна времени задержки возникновения дуги на аноде.

Экспериментальные данные

1. Зависимость амплитуды от минимальной длительности поджигающего импульса $U_n(\tau)$ для режима устойчивого зажигания дуги приведена на рис. 2*. Характеристика зажигания при возбуждении дуги положительными импульсами напряжения приведена

для сравнения на этом же рисунке. Из рис. 2 видно, что крутизна $\frac{d\tau}{dU}$ кривой 1 выше, чем кривой 2. При одном и том же τ зажигание дуги отрицательными импульсами напряжения происходит при большей амплитуде, если же $U_n = \text{const}$, то при большем значении времени задержки τ .

2. Влияние давления паров ртути на параметры поджигающих импульсов приведено на рис. 3 и 4. Кривые показывают, что имеется оптимальная область давления паров ртути, в которой абсолютное значение амплитуды возбуждающих дугу импульсов наименьшее. Для положительных импульсов минимум растянут в области давлений 10—20 мк рт. ст. При переходе к большим значениям τ ($\tau > 8$ мксек) минимум исчезает.

Характеристика зажигания для отрицательных импульсов имеет ярко выраженный минимум в другой, более узкой, области давлений (3—4 мк рт. ст.). Минимум не пропадает в интервале измерения $\tau = 6—10$ мксек.

Обсуждение результатов

1. Как показывают экспериментальные данные, низковольтная дуга при наличии вспомогательного разряда может возбуждаться не только положительными, но и отрицательными импульсами напряжения на сетке. При отрицательных импульсах управление моментом зажигания дуги в тиратроне, находящемся в режиме ждущего релаксационного генератора, осуществляется почти без потребления управляющей мощности. Однако при этом способе управления дуга запаздывает за время действия импульса и время, необходимое для формирования пробоя газа.

2. Приведенные на рис. 3, 4 характеристики говорят о том, что пашеновская зависимость $U_n(\rho_{\text{рт}})$ имеет некоторую форму проявления и для импульсного режима. Эти же характеристики показывают, что место расположения перемещаемого плазменного катода различно (условное расстояние d между анодом и головкой вспомогательного разряда) для предпускового режима при поджигании дуги положительными и отрицательными импульсами напряжения. В случае, отмеченном на рис. 3, d значительно больше, чем в случае, приведенном на рис. 4. Поле сетки «сдувает» плазму, распространяющуюся вдоль нити в направлении к накаливаемому катоду, увеличивая расстояние d . Поэтому минимум характеристик перемещен в узкую область малых давлений 3—4 мк рт. ст. Минимуму характеристик соответствуют наилучшие условия формирования дуги при лавинообразном процессе (максимум коэффициента ионизации).

3. При возбуждении дуги положительными импульсами процесс поджигания дуги развивается в основном за счет предпускового сеточного тока при фиксированном расстоянии анод — сетка. Изменение параметра d , обусловленное перемещением вспомогательного разряда вдоль нити при изменении давления газа, мало влияет на предразрядные процессы в экранированном анодно-сеточном пространстве, поскольку сетка формирует свой собственный поджигающий дугу разряд.

Поэтому, вероятно, минимум характеристик растянут и занимает другую, более широкую область больших давлений. Изменение хода характеристик при различных τ показывает, что изменение минимальной длительности импульса приводит к изменению численных значений коэффициента ионизации α .

* Характеристики (рис. 2, 3, 4) были определены при участии М. А. Федотова.

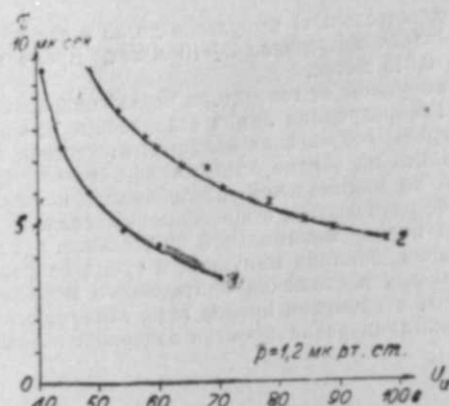


Рис. 2. Характеристики зажигания:
1 — положительные импульсы; 2 — отрицательные импульсы.

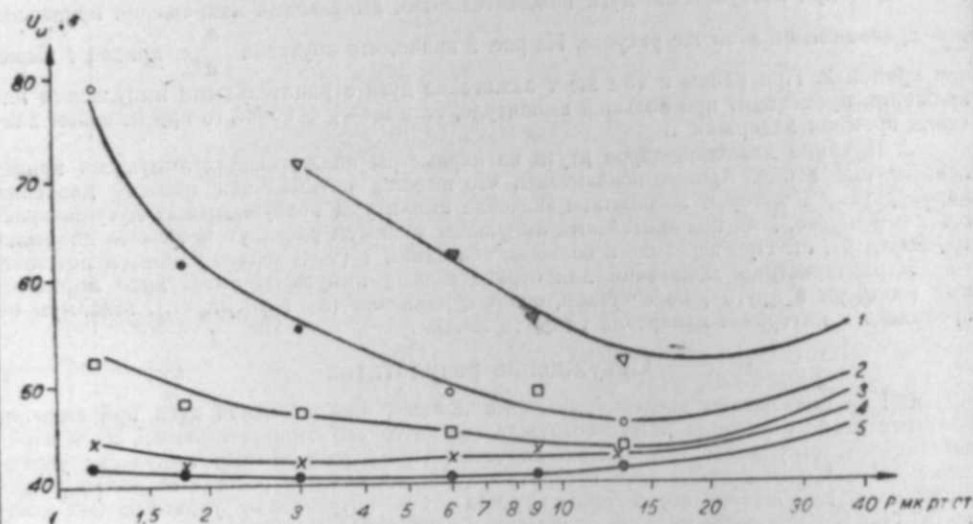


Рис. 3. Влияние давления паров ртути на амплитуду поджигающих положительных импульсов при параметрах τ , мксек:

1 — 2; 2 — 4; 3 — 6; 4 — 8; 5 — 10.

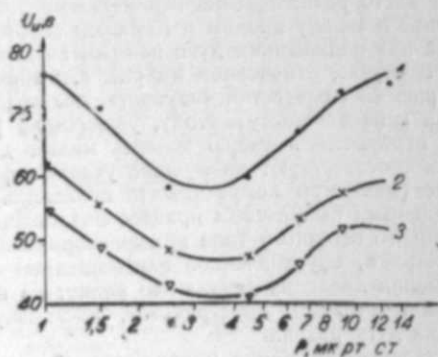


Рис. 4. Влияние давления паров ртути на амплитуду поджигающих отрицательных импульсов при параметрах τ , мксек:

1 — 6; 2 — 8; 3 — 9,9.

Устойчивая работа простой модели экранированного тиратрона (см. рис. 1) является показателем того, что для возбуждения дуги с помощью отрицательных импульсов напряжения может быть пригоден любой промышленный тиратрон, если он имеет отдельные выводы от сетки и нити. Физическая причина возбуждения дуги для подобных приборов заключается в том, что при наложении отрицательного импульса на сетку электроны, находящиеся в «головке» вспомогательного разряда, вытесняются из сеточной области, оставляя положительный объемный заряд. После снятия импульса положительный заряд ионов создает поле, ускоряющее электроны в направлении анода и усиливающее коэффициент ионизации α .

Заключение

1. Чем короче возбуждающий дугу сеточный импульс тиратрона с управляющими сеткой и нитью при заданном давлении ртутного пара, тем выше должна быть его абсолютная амплитуда. Критическая отрицательная амплитуда и длительность импульса всегда несколько выше критических амплитуды и длительности положительного импульса.

2. Имеется оптимальная область давлений паров ртути, в которой абсолютное значение амплитуды возбуждающего дугу импульса наименьшее. Для испытанного макета прибора при положительных импульсах эта область давлений выше и более растянута (10–20 мк рт. ст.) по сравнению с областью отрицательных импульсов (3–4 мк рт. ст.). Сдвиг минимума характеристик в сторону малых давлений хорошо объясняется с помощью изменения «пробивного» расстояния d при воздействии поля сетки на плазменный катод вспомогательного разряда.

3. В исследованном интервале давлений (1–40 мк рт. ст.) дуга в приборе возникает после окончания действия критического отрицательного импульса. Процесс зажигания осуществляется за счет «реакции» плазмы слабого поджигающего разряда, вызванной импульсом сетки. Приведенная физическая картина возбуждения дуги хорошо объясняет наблюдавшиеся закономерности.

Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
20/V 1963

В. М. РОЖКОВ, Р. В. ГОСТРЕМ

ИМПУЛЬСНЫЙ ВОЛЬТМЕТР ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Серийно выпускаемые импульсные вольтметры типа ВЛИ и МВИ, работающие на основе пикового детектора, обладают недостаточной точностью измерения (5%). Более высокую точность имеют вольтметры, основанные на принципе сравнения. В работе [1] описывается измеритель импульсного напряжения с погрешностью $\sim 0,3\%$, в котором используется триггер Шмитта в качестве дискриминирующего элемента. Еще меньшую погрешность имеют схемы сравнения на полупроводниковых приборах [2, 3]. Однако к недостатку всех перечисленных вольтметров необходимо отнести их ограниченную область применения и сложную принципиальную схему.

В настоящей работе описывается простой импульсный вольтметр повышенной точности, который работает по принципу сравнения.

В основе прибора лежит пороговая схема, собранная на лампе 6Л1П, анодно-сеточная характеристика которой имеет участок резкого «скачка» тока (точка a , рис. 1). Чувствительность или наименьший прирост напряжения, который требуется для осуществления этого «скачка», составляет $0,035$ в, поэтому с помощью такой лампы можно регистрировать импульсы, отличающиеся по амплитуде на $0,035$ в.

На рис. 2 приведена принципиальная схема вольтметра, который состоит из порогового устройства L_2 , инверсного каскада L_1 и триггера L_3 . Для измерения положительных импульсов необходимо с помощью переключателя P_2 и потенциометра R_4 зафиксировать отрицательные напряжения на сетке 6Л1П, при которых амплитуда импульса на $0,035$ в превышает пороговое значение схемы, определяемой точкой на характеристике лампы. При этом на аноде 6Л1П происходит резкое изменение напряжения, которое через диод D_1 запускает триггер. Работа триггера контролируется неоновыми

лампочками L_4 и L_5 . Если амплитуда измеряемых импульсов меньше порогового напряжения схемы, то триггер не срабатывает и горит только одна лампочка. Для того, чтобы триггер не запускался импульсами, возникающими на начальном участке анодной характеристики лампы, диод D_1 подпирается напряжением $+11$ в. Сумма пометочной характеристики лампы, диод D_1 подпирается напряжением $+11$ в, определяющих ступенчатого переключателя Π_2 и индикатора V со шкалой $0-10$ в, определяемых в момент загорания неоновых лампочек, дает амплитуду измеряемых импульсов.

Для измерения отрицательных импульсов предусмотрен инверсный каскад с коэффициентом передачи $K=1$. Каскад собран по схеме с глубокой отрицательной обратной связью по току, что позволяет получить линейность и стабильность каскада $\approx 0,1\%$ [4]. Для установки нуля вольтметра переключатель Π_2 и потенциометр R_{43} переводятся в нулевое положение. Потенциометр R_{43} устанавливается так, чтобы отрицательное смещение на лампе 6Л1П отличалось от порогового напряжения не более чем на $0,04$ в, что контролируется нажатием кнопки K_1 . Так как лампа 6Л1П имеет гистерезис ≈ 1 в, то для возвращения ее в исходную рабочую точку собрана вспомогательная схема с реле времени. В приборе предусмотрена калибровка делителя напряжения потенциометром R_{23} .

Погрешность вольтметра складывается из следующих величин: Δ_1 — ошибка, зависящая от пороговой чувствительности лампы; Δ_2 — ошибка стрелочного индикатора, обусловленная его классом точности; Δ_3 — ошибка, возникающая в результате шунтирования стрелочным индикатором V потенциометра R_{43} ; Δ_4 — ошибка, определяемая нестабильностью коэффициента усиления инвертора.

Тогда при $\Delta_1 = \pm 0,035$ в; $\Delta_2 = \pm 0,1$ в для индикатора класса 1 со шкалой $0-10$ в (микроамперметр М-24); $\Delta_3 = \pm 0,1$ в и $\Delta_4 = \pm 0,1$ в общая среднеквадратичная погрешность измерения составляет $\pm 0,2$ в, или $\pm 0,2\%$ к шкале 100 в.

Достоинством описываемой схемы является то, что на точность измерения пренебрежимо малое влияние оказывает скважность импульсов. Импульсное напряжение превышает уровень порога всего на $0,035$ в. Поэтому даже в самом худшем случае, когда скважность импульсов $Q=2$, смещение, вызванное постоянной составляющей периодических импульсов, будет равно $0,017$ в. Очень малое влияние оказывают и сеточные токи 6Л1П. Измерения показали, что при $Q=2$ средняя составляющая их $< 0,1$ мка.

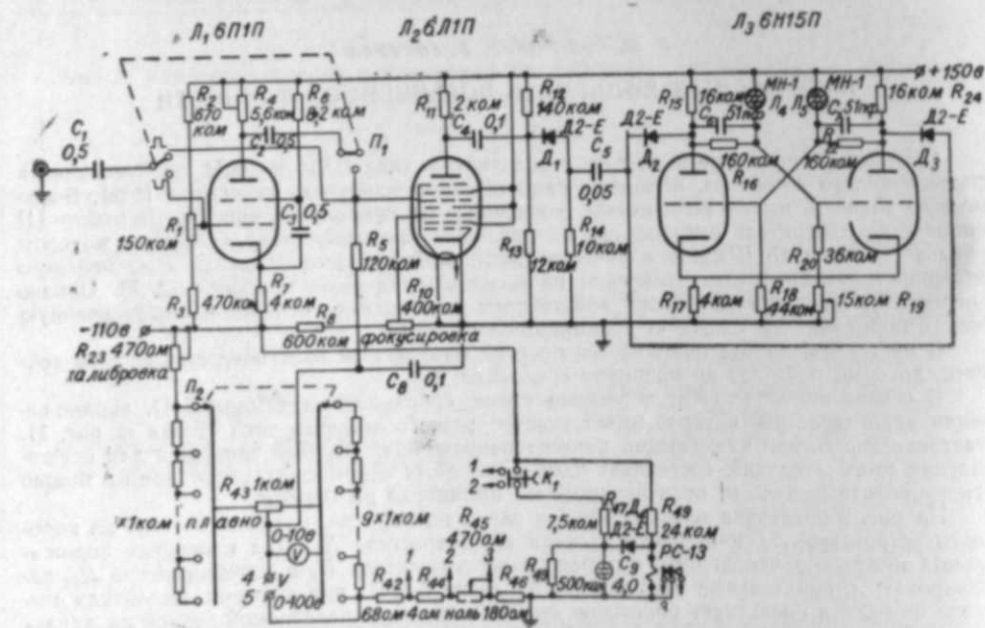


Рис. 2.

Напряжению сетки

ток анода

Рис. 1.

В результате испытаний вольтметра было установлено, что при измерении положительных и отрицательных импульсов амплитудой $1-100$ в и длительностью не менее $0,2$ мксек погрешность составляет $\pm 0,2\%$ к шкале 100 в. Погрешность практически не зависит от скважности импульсов.

Если уменьшить ошибки, возникающие в результате измерения постоянного напряжения, то в соответствии с принципиальными возможностями схемы точность вольтметра повысится до $0,05-0,1\%$ для положительных импульсов. С этой целью при измерении напряжения в схеме предусмотрена возможность подключить потенциометр или цифровой вольтметр (гнезда 4, 5). Для повышения чувствительности и входного сопротивления вольтметра целесообразно с описанным пороговым устройством компоновать дифференциальный усилитель.

Необходимо отметить, что на основе предлагаемой пороговой схемы можно создать автоматический измеритель напряжения с цифровой индикацией.

В обсуждении конструкции элементов схемы принимал участие Л. Н. Гуськов.

Институт радиопизики и электроники
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
27/XII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Златаров, ПТЭ, № 3, 1961.
2. Ланг (O. V. Lang). Электроника (русский перевод), № 36, 1961.
3. С. Н. Vincent and W. G. King. Nuclear Instr. and Methods, т. 6, № 1, 1959.
4. А. А. Санин, Электронные приборы ядерной физики. Физматгиз, 1961.

А. Г. СЕЯН

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ПРОЦЕССОВ
И ПОЛЕЙ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

При решении практических задач авторегулирования и контроля часто приходится сталкиваться с такими объектами, динамика которых описывается уравнениями с частными производными относительно регулируемого или измеряемого параметра, — это различного рода аппараты теплообмена и массообмена в энергетике, химической промышленности и т. п.

Представление выходной реакции от входного возмущения или помех, распределенных по длине объекта, как результат прохождения этих сигналов через фиктивную систему с сосредоточенными параметрами и запаздыванием иногда лишает многих возможностей улучшения качества динамических систем. Используя пространственно-временное изменение состояния объекта, можно создавать более точные системы управления [1].

В связи с тем, что статистические задачи анализа и синтеза требуют знания исходных корреляционных функций, в данной статье поставлена задача нахождения авто- и взаимных корреляционных функций центрированных случайных процессов в различных пространственных точках системы. Насколько известно автору, подобные вопросы статистической динамики для систем с распределенными параметрами не рассматривались.

Пусть поведение стационарной динамической системы описывается неоднородным линейным дифференциальным уравнением вида

$$L[u] = n(x, t), \quad (1)$$

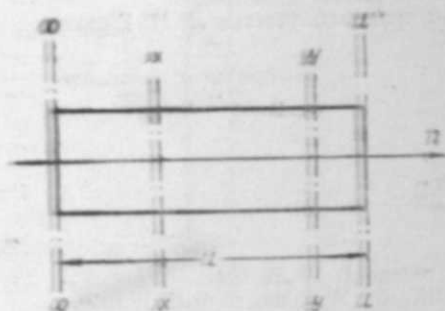
где

$$L[u] = a \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + b \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + c \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t \partial x} + d \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + e \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + f u(x, t), \quad (2)$$

Система (1) находится под воздействием двух краевых возмущений $\mu(t)$ и $\nu(t)$, представляющих стационарные процессы, и внешнего случайного поля, корреляционная функция которого

$$R_{\mu\nu}^{(n)}(x, y, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n(x, t) n(y, t + \tau) dt \quad (3)$$

зависит от двух значений пространственной координаты и временного сдвига (см. рисунок), т. е. при фиксированном x $u(x, t)$ представляет стационарный процесс, а для двух различных сечений процессы стационарно связаны и удовлетворяют условиям эргодичности [2]. Известно [3], что общее решение неоднородного уравнения (1) при нулевых начальных и линейных краевых условиях равно сумме решений однородного уравнения.



$$L[u] = 0$$

при неоднородных краевых условиях и неоднородного уравнения при нулевых условиях. В свою очередь, решение однородного уравнения может быть представлено суммой двух реакций: от возмущения $\mu(t)$ при нулевом условии справа и $\nu(t)$ при нулевом — слева. Поскольку линейные системы с распределенными параметрами подчиняются

принципу суперпозиции, подобно системам с сосредоточенными параметрами, то нахождение реакции от краевых возмущений произвольного вида возможно с помощью импульсной переходной функции, которая в рассматриваемом случае зависит от пространственной координаты как от параметра и определяется известными методами [4], т. е.

$$u_{\mu}(x, t) + u_{\nu}(x, t) = \int_0^{\infty} k_{\mu}(x, \theta) \mu(t - \theta) d\theta + \int_0^{\infty} k_{\nu}(x, \theta) \nu(t - \theta) d\theta. \quad (4)$$

Подобно тому как реакции (4) представляют собой наложение импульсных характеристик, вызываемых действиями процессов $\mu(t)$ и $\nu(t)$ на интервале времени от $-\infty$ до t , так реакция от внешнего поля может быть представлена в виде

$$u_n(x, t) = \int_0^L d\xi \int_0^{\infty} k_n(x, \xi, \theta) n(\xi, t - \theta) d\theta, \quad (5)$$

где $k_n(x, \xi, \theta)$ — импульсная переходная функция системы на возмущение

$$n(x, t) = \delta(t) \delta(x - \xi).$$

В теории теплопроводности $k_n(x, \xi, \theta)$ называется еще функцией мгновенного точечного источника. Итак, общее решение уравнения (1) представляется

$$u(x, t) = \int_0^{\infty} k_{\mu}(x, \theta) \mu(t - \theta) d\theta + \int_0^{\infty} k_{\nu}(x, \theta) \nu(t - \theta) d\theta + \int_0^L d\xi \int_0^{\infty} k_n(x, \xi, \theta) n(\xi, t - \theta) d\theta. \quad (6)$$

Совершенно аналогично может быть записано решение $u(y, t)$ для другого произвольного сечения, откуда взаимная корреляционная функция

$$\begin{aligned} R_{yx}^{(u)}(x, y, \tau) = & \int_0^{\infty} k_{\mu}(x, \theta) d\theta \int_0^{\infty} k_{\mu}(y, \lambda) R_{\mu}(\tau + \theta - \lambda) d\lambda + \\ & + \int_0^{\infty} k_{\nu}(x, \theta) d\theta \int_0^{\infty} k_{\nu}(y, \lambda) R_{\nu}(\tau + \theta - \lambda) d\lambda + \int_0^L d\xi \int_0^L d\psi \int_0^{\infty} k_{\mu n}(x, \xi, \theta) d\theta \times \\ & \times \int_0^{\infty} k_{n \mu}(y, \psi, \lambda) R_{\mu n}(\xi, \psi, \tau + \theta - \lambda) d\lambda + \int_0^{\infty} k_{\mu}(y, \lambda) d\lambda \int_0^{\infty} k_{\nu}(x, \theta) R_{\nu \mu}(\tau + \theta - \lambda) d\theta + \\ & + \int_0^{\infty} k_{\nu}(y, \lambda) d\lambda \int_0^{\infty} k_{\mu}(x, \theta) R_{\mu \nu}(\tau + \theta - \lambda) d\theta + \int_0^L d\xi \int_0^L d\psi \int_0^{\infty} k_{\mu}(y, \lambda) d\lambda \times \\ & \times \int_0^{\infty} R_{\mu n}(\xi, \tau + \theta - \lambda) k_n(x, \xi, \theta) d\theta + \int_0^L d\xi \int_0^L d\psi \int_0^{\infty} k_{\nu}(y, \lambda) d\lambda \int_0^{\infty} k_n(x, \xi, \theta) \times \\ & \times R_{\nu n}(\xi, \tau + \theta - \lambda) d\theta + \int_0^L d\psi \int_0^{\infty} k_{\mu}(x, \theta) d\theta \int_0^{\infty} k_n(y, \psi, \lambda) R_{n \mu}(\psi, \tau + \theta - \lambda) d\lambda + \\ & + \int_0^L d\psi \int_0^{\infty} k_{\nu}(x, \theta) d\theta \int_0^{\infty} k_n(y, \psi, \lambda) R_{n \nu}(\psi, \tau + \theta - \lambda) d\lambda. \quad (7) \end{aligned}$$

Формула (7) дает решение поставленной задачи. Однако решение во временной области может представить трудности, особенно для систем с распределенными параметрами, поэтому, преобразовывая (7) в частотную область по переменному τ , получим

$$\begin{aligned} S_{yx}^{(u)}(x, y, \omega) = & \Phi_{\mu}^*(x, \omega) \Phi_{\mu}(y, \omega) S_{\mu}(\omega) + \Phi_{\nu}^*(x, \omega) \Phi_{\nu}(y, \omega) S_{\nu}(\omega) + \\ & + \int_0^L d\xi \int_0^L d\psi \int_0^{\infty} \Phi_n^*(x, \xi, \omega) \Phi_n(y, \psi, \omega) S_{\xi \psi}^{(n)}(\xi, \psi, \omega) d\psi + \Phi_{\mu}(y, \omega) \Phi_{\nu}^*(x, \omega) S_{\mu \nu}(\omega) + \\ & + \Phi_{\nu}(y, \omega) \Phi_{\mu}^*(x, \omega) S_{\nu \mu}(\omega) + \int_0^L \Phi_{\mu}(y, \omega) \Phi_n^*(x, \xi, \omega) S_{\mu n}(\xi, \omega) d\xi + \\ & + \int_0^L \Phi_{\nu}(y, \omega) \Phi_n^*(x, \xi, \omega) S_{\nu n}(\xi, \omega) d\xi + \int_0^L \Phi_{\mu}^*(x, \omega) \Phi_n(y, \psi, \omega) S_{n \mu}(\psi, \omega) d\psi + \\ & + \int_0^L \Phi_{\nu}^*(x, \omega) \Phi_n(y, \psi, \omega) S_{n \nu}(\psi, \omega) d\psi. \quad (8) \end{aligned}$$

Если на рассматриваемом участке пространства проявляется в основном влияние внешнего поля и одного из краевых условий, то приходим к постановке задачи на полуограниченной прямой $0 \leq t < \infty$. В последнем случае формула (8) существенно упрощается

$$\begin{aligned} S_{yx}^{(u)}(x, y, \omega) = & \Phi_{\mu}^*(x, \omega) \Phi_{\mu}(y, \omega) S_{\mu}(\omega) + \\ & + \int_0^L d\xi \int_0^L d\psi \int_0^{\infty} \Phi_n^*(x, \xi, \omega) \Phi_n(y, \psi, \omega) S_{\xi \psi}^{(n)}(\xi, \psi, \omega) d\psi + \\ & + \int_0^L \Phi_{\mu}(y, \omega) \Phi_n^*(x, \xi, \omega) S_{\mu n}(\xi, \omega) d\xi + \\ & + \int_0^L \Phi_{\nu}^*(x, \omega) \Phi_n(y, \psi, \omega) S_{n \mu}(\psi, \omega) d\psi. \quad (9) \end{aligned}$$

По спектральной плотности $S_{yx}^{(u)}(x, y, \omega)$ обратным преобразованием Фурье можно определить корреляционную функцию для любых значений x, y координат пространства [5].

Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
25/1 1963

Приложение

Рассмотрим пример. Пусть динамика системы описывается уравнением вида [6]

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + w \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = h [n(x, t) - u(x, t)], \quad (10)$$

характеризующим процесс теплообмена движущейся среды во внешнем температурном поле. Случайное однородное поле [7] примем со спектральной плотностью

$$S_{yx}^{(n)}(x, y, \omega) = e^{-|x-y|} S_{(\omega)}^{(n)},$$

а для входного сигнала

$$S_p(\omega) = 0.$$

Тогда искомая спектральная плотность поля $u(x, t)$, согласно (9), будет

$$S_{yx}^{(u)}(x, y, \omega) = \int_0^{\infty} d\xi \int_0^{\infty} \Phi_n^*(x, \xi, \omega) \Phi_n(y, \psi, \omega) S_{\psi\xi}(\xi, \psi, \omega) d\psi. \quad (11)$$

Передаточная функция $\Phi_n(x, \xi, \omega)$ для уравнения (10) имеет вид

$$\Phi_n(x, \xi, \omega) = \frac{h}{w} e^{-\frac{h}{w}(x-\xi) - \frac{j\omega}{w}(x-\xi)}, \quad x > \xi \quad (12)$$

$$\Phi_n(x, \xi, \omega) = 0, \quad x < \xi.$$

В соответствии с формулой (12)

$$S_{yx}^{(u)}(x, y, \omega) = \int_0^x d\xi \int_0^y \Phi_n^*(x, \xi, \omega) \Phi_n(y, \psi, \omega) S_{\psi\xi}^{(n)}(\xi, \psi, \omega) d\psi, \quad (13)$$

откуда спектральная плотность для значений $y > x$

$$S_{yx}^{(u)}(x, y, \omega) = h^2 S_{(\omega)}^{(n)} e^{-\frac{h-j\omega}{w}x - \frac{h+j\omega}{w}y} \left\{ \frac{e^{\frac{2h}{w}x} - 1}{2h(h+w+j\omega)} - \frac{e^{\frac{h-w-j\omega}{w}x} - 1}{(h+w+j\omega)(h-w-j\omega)} + \frac{e^{\frac{h-w+j\omega}{w}y} \left[\frac{e^{\frac{h+w-j\omega}{w}x} - 1 \right]}{(h-w+j\omega)(h+w-j\omega)} - \frac{e^{\frac{2h}{w}x} - 1}{2h(h-w+j\omega)} \right\}. \quad (14)$$

На достаточно большом удалении от входного сечения, т. е. при больших значениях x, y , спектральная плотность

$$S_{yx}^{(u)}(x, y, \omega) = h^2 S_{(\omega)}^{(n)} \left[\frac{e^{-\frac{(y-x)h + (y-x)j\omega}{w}}}{2h(h+w+j\omega)} - \frac{e^{-\frac{(y-x)h + (y-x)j\omega}{w}}}{2h(h-w+j\omega)} + \frac{e^{-(y-x)}}{(h-w+j\omega)(h+w-j\omega)} \right] \quad (15)$$

и поле $u(x, t)$ также становится однородным; при этом спектральная плотность процесса

$$S_{yx}^{(u)}(x, y, \omega) \Big|_{x=y} = S_{(\omega)}^{(n)} \frac{h(w+h)}{(w+h)^2 + \omega^2}. \quad (16)$$

Знание $S_{yx}^{(u)}(x, y, \omega)$ для рассматриваемой системы позволяет синтезировать сложные измерительные системы более высокой точности [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Трапезников, Кибернетика и автоматическое управление. Автоматика и телемеханика, т. XXIII, № 3, 1962.
2. В. С. Пугачев, Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М., Физматгиз, 1960.
3. А. Н. Тихонов, А. А. Самарский, Уравнение математической физики. М., Гостехтеориздат, 1953.
4. М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабаб, Методы теории функций комплексного переменного. М., Физматгиз, 1958.
5. В. В. Солодовников, Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. М., Физматгиз, 1960.
6. Б. Н. Девятков, Переходные режимы работы непрерывно действующих теплообменников. ДАН СССР, т. XC, № 5, 1953.
7. А. М. Обухов, Вероятностное описание однородных полей. Укр. матем. журнал, т. VI, № 1, 1954.
8. Н. Н. Шумиловский, Б. С. Синицын, Основные задачи теории автоматических измерений. Докл. сессии АН СССР по научным проблемам автоматизации производства, т. III, М., Изд-во АН СССР, 1957.

А. М. ИВАНЧЕНКО, В. Н. КОРОБЕЙНИКОВА

СХЕМА ДЛЯ ПЕРЕМНОЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При измерении низких температур по величине теплового шума [1] возникает необходимость в перемножении переменных напряжений в диапазоне частот 500 гц-20 кгц.

Как известно [2, 3, 4], при перемножении переменных напряжений целесообразно использовать множительные устройства непрямого действия. Наиболее простым преобразованием является известное соотношение вида:

$$U(t) = U_1(t) \cdot U_2(t) = \frac{1}{4} \{ [U_1(t) + U_2(t)]^2 - [U_1(t) - U_2(t)]^2 \}. \quad (1)$$

В этом случае операция умножения заменяется операциями сложения, вычитания и возведения в квадрат. Дальнейшие упрощения схемы множителя можно осуществить, учитывая специфику измерений температуры по методу [1]. Оказывается, что достаточным интервалом входных амплитуд являются значения входных напряжений (U_1 и U_2)

от 0,1 в до 1 в. Пониженные требования предъявляются также и к допустимой погрешности работы прибора. Возможность ограничить работу блока областью переменных напряжений для сравнительно узкого интервала частот позволяет внести дальнейшие улучшения в схему [5].

Необходимость получить строгую симметричность характеристик по обоим входам исключает применение весьма перспективных множительных схем на эффекте Холла [6, 7].

На рисунке приведена схема множителя. Входные напряжения подводятся к сеткам сумматора, выполняющего сложение $U_1 + U_2$, полученная сумма через инвертор и прямо подается на две сетки квадратора, выполняющего одновременно операции возведения в квадрат и вычитания линейных членов.

Квадрат суммы через инвертор подается на один вход выходного сумматора; на другой вход сумматора от второго канала подается квадрат разности (с обратным знаком по отношению к квадрату суммы). При этом на выходе сумматора происходит вычитание квадратичных членов, а удвоенные произведения $U_1 \cdot U_2$ складываются.

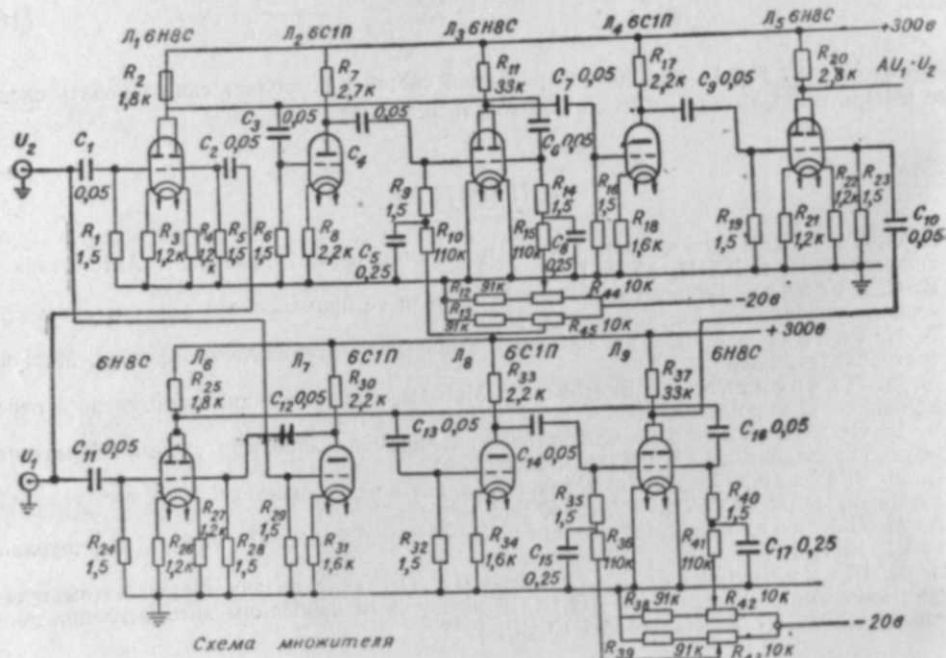


Схема множителя

В качестве квадратора выбрана лампа 6Н8С, у которой середина квадратичного участка сеточной характеристики [4] соответствует смещению $U_{g1} = -13,5$ в и описывается уравнением $y = 0,4x + 0,2x^2$. Лампы отбирались по совпадению характеристик на двухлучевом осциллографе при подаче на сетки пилообразного напряжения.

Усиление всех каскадов устанавливалось равным 1, при этом коэффициент при произведении был близок к расчетному.

Налаживание схемы проводилось по следующим этапам:

1) на сетки сумматора 1-го канала подавалось напряжение $U_1 = U_0 \sin \omega t$, на выходе было получено напряжение $U = 2U_0 \sin \omega t$ с точностью до 1%;

2) на сетки сумматора 2-го канала подавались напряжения $U_1 = U_0 \sin \omega t$ и $U_2 = -U_0 \sin \omega t$, в этом случае напряжение на выходе составляло менее 0,01 от входного;

3) на входы квадраторов подавались напряжения $U_1 = U_0 \sin \omega t$ и $U_2 = -U_0 \sin \omega t$. На выходе квадратора возникало напряжение $U = U_0^2 \sin 2\omega t$ и остаточное напряжение основной частоты, амплитуда которого составляла 0,01 U_0 .

Схема также проверялась при перемножении двух напряжений разных частот, от 200 гц до 50 кГц.

На вход множителя подавались напряжения $U_1 \sin \omega_1 t$ и $U_2 \sin \omega_2 t$. Сигнал на выходе содержал сигналы суммарной и разностной частот ($\omega_1 + \omega_2$; $\omega_1 - \omega_2$) и ослабленные сигналы до 0,01 первоначальной величины $U_1 \sin \omega_1 t$ и $U_2 \sin \omega_2 t$.

Общая погрешность при длительной работе $\pm 2\%$.

Вывод

Разработана схема множительного блока, позволяющего производить умножение двух переменных напряжений в диапазоне 200 гц — 50 кГц, амплитудой от 0,05 до 2 в. Преимуществом данной схемы является простота конструкции, строгая симметричность по входам и устойчивость в работе.

Институт теплофизики
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
20/XII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. J. Fink, A new absolute noise thermometer at low temperatures Canadian J. of Phys., 37, 12, 1959.
2. Б. Я. Коган, Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. М., Физматгиз, 1959.
3. Г. А. Корн, Т. М. Корн, Электронные моделирующие устройства, ИЛ, 1955.
4. Генерирование электрических колебаний специальной формы, ч. II. М., Изд-во «Сов. радио», 1951.
5. И. М. Витенберг, О выборе усилителей для моделирующих установок. Вычислительная техника, вып. III. М., Госатомиздат, 1962.
6. L. Löfgren, Analog multiplier based on the Hall effect. J. Appl. Phys. 29, 1958.
7. Перемножение сигналов на датчиках э.д.с. Холла. Тр. учебных ин-тов связи, вып. I, Л., Мин-во связи СССР, 1960.

П. И. ХЛОМЕНКО

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СО СТУПЕНЧАТОЙ МОДИФИКАЦИЕЙ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Известен ряд быстродействующих систем автоматического регулирования (САР): САР с корректирующим дифференциатором в цепи рассогласования, комбинированные САР с управлением по отклонению и возмущению [1], САР с нелинейными корректирующими звеньями, вычислительными устройствами и т. п. [2—5].

В перечисленных системах либо не удовлетворяется критерий оптимальности по минимуму времени переходного процесса при отсутствии перерегулирования и наименьшем значении максимального ускорения (минимаксе ускорения) выходной координаты, либо применяются сравнительно сложные управляющие устройства.

САР со сравнительно высоким быстродействием может быть получена модификацией входного сигнала в системах с малым демпфированием, склонных к колебательным переходным процессам и даже находящихся вблизи границы устойчивости [6, 7].

Структурная схема такой системы изображена на рис. 1. На рис. 2 изображена схема набора этой системы на электронной модели.

Если ступенчатый входной сигнал разбить на два ступенчатых сигнала, следующих друг за другом через определенный интервал времени, то при надлежащем выборе параметров колебания, возбужденные первым сигналом, могут быть погашены за счет колебаний, возбужденных вторым ступенчатым сигналом. Это показано на рис. 3, где $X_1 = C_1(\tau)$ — первый ступенчатый входной сигнал (предварительный сигнал);

X_2 — колебания выходной координаты, вызванные первым ступенчатым сигналом;

$X_1 = C(\tau)$ — второй ступенчатый сигнал, представляющий собой основной сигнал, обрабатываемый системой (подается при снятии первого сигнала);

X_2^0 — колебания выходной координаты, вызванные основным ступенчатым сигналом;

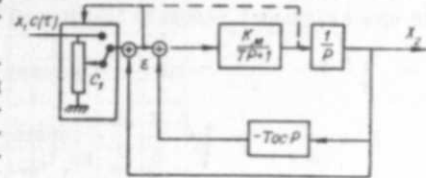


Рис. 1.

X_2 — выходная координата, представляющая собой сумму колебаний X_2' и X_2^0 ;
 δ — зона нечувствительности;
 $\tau\delta$ — время регулирования;
 τ_C — время достижения заданного уровня «С» (время подачи основного сигнала);
 C_1 — величина предварительного сигнала;
 ω — круговая частота свободных колебаний;
 ψ — начальная фаза.

Наилучшим будет переходный процесс, при котором $X_1 = X_2$, т. е. входной сигнал обрабатывается мгновенно.

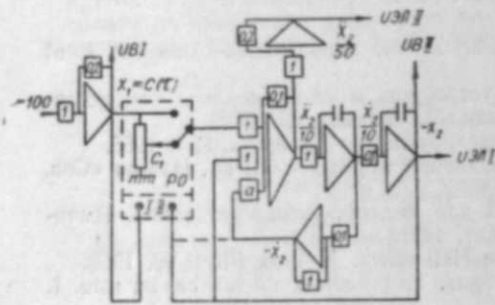


Рис. 2.

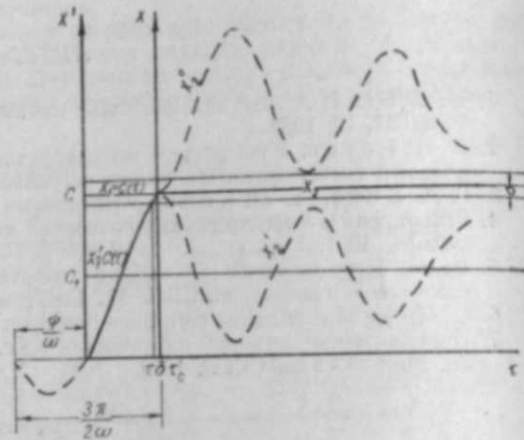


Рис. 3.

Составим уравнение переходного процесса в общем виде и определим, при каких условиях возможно тождественное равенство входной и выходной координат. Дифференциальное нормированное уравнение системы

$$X_2(Z^2 + aZ + 1) = C(\tau). \quad (1)$$

Уравнение переходного процесса:

$$X_2 = C + e^{-\frac{a}{2}\tau} \cdot \left\{ [X_2(0) - C] \cos \omega\tau + \frac{\dot{X}_2(0) - \frac{a}{2} [X_2(0) - C]}{\omega} \cdot \sin \omega\tau \right\} \quad (2)$$

при $X_1 = C(\tau)$,

где при начальных условиях $X_2(0) \neq 0$ и $\dot{X}_2(0) \neq 0$.

$$\omega = \sqrt{1 - \frac{a^2}{4}} = \sin \psi \text{ — круговая частота колебаний;}$$

$$Z = \frac{d}{d\tau} = p \sqrt{\frac{T}{K}} \text{ — оператор дифференцирования по безразмерному времени } \tau;$$

$$P = \frac{d}{dt} \text{ — оператор дифференцирования по времени } t, \text{ сек;}$$

$$a = \tau_0 + \tau_{oc} \text{ — коэффициент, характеризующий совместное действие демпфирования и скоростной обратной связи;}$$

$$\tau_0 = \frac{1}{\sqrt{KT}} \text{ — постоянная безразмерного времени, характеризующая демпфирование системы;}$$

$$K \text{ — коэффициент усиления системы по скорости (1/сек);}$$

$$T \text{ — постоянная времени сервомотора и объема регулирования (сек);}$$

$$\tau_{oc} = T_{oc} \frac{K_M}{\sqrt{KT}} \text{ — постоянная безразмерного времени, характеризующая скоростную обратную связь;}$$

$$K_M \text{ — коэффициент усиления сервомотора по скорости (1/сек);}$$

$$T_{oc} \text{ — постоянная времени скоростной обратной связи (сек).}$$

Чтобы обеспечить равенство $X_2 = C$, т. е. получить идеальный переходный процесс, необходимо иметь начальные условия:

$$X_2(0) = C; \quad \dot{X}_2(0) = 0. \quad (3)$$

Это возможно, если подать предварительный сигнал $X_1' = C_1(\tau)$ с опережением τ_C , в этом случае уравнение (1) принимает вид:

$$X_2^1(Z^2 + aZ + 1) = C_1(\tau). \quad (4)$$

Уравнение переходного процесса будет:

$$X_2' = C_1 - \frac{C_1}{\sin \psi} \cdot e^{-\frac{a}{2}\tau} \cdot \sin(\omega\tau + \psi), \quad (5)$$

где при нулевых начальных условиях $X_2'(0) = \dot{X}_2'(0) = 0$

$$\psi = \arccos \frac{a}{2} \text{ — начальная фаза;}$$

$$\omega = \sqrt{1 - \frac{a^2}{4}} = \sin \psi \text{ — круговая частота колебаний.}$$

Время опережения

$$\tau_C = \frac{1,5\pi - \psi}{\omega} \quad (6)$$

(см рис. 3). В этот момент времени выходная координата X_2' должна достигнуть своего максимального значения, удовлетворяющего начальным условиям (3), т. е. $X_2' = C$, но $\sin(\omega\tau_C + \psi) = -1$, следовательно, величина предварительного ступенчатого сигнала

$$C_1 = \frac{C}{1 + e^{-\frac{a}{2}\tau_C} \cdot \frac{\tau_C}{\sin \psi}} \quad (7)$$

Зависимость отношения величины предварительного ступенчатого сигнала на входе к величине полного ступенчатого сигнала C_1/C от значения коэффициента a дана графически на рис. 4.

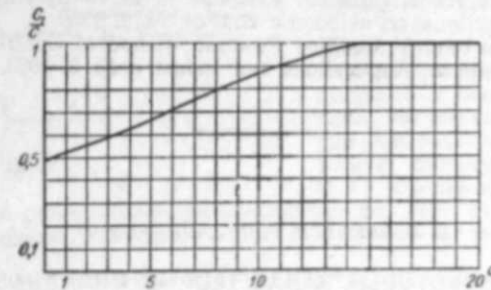


Рис. 4.

Длительность переходного процесса τ_δ может быть определена из уравнения:

$$X_2'(\tau_\delta) = C - \delta = C_1 \left[1 - \frac{\sin(\omega\tau_\delta + \psi)}{\sin \psi} \cdot e^{-\frac{a}{2}\tau_\delta} \right] \quad (8)$$

при $a < 2$ (см. рис. 3).

При $a = 2$ имеем граничный случай — система аperiodически устойчива, переходный процесс протекает без перерегулирования.

Ускорение выходной координаты можно определить, дважды дифференцируя уравнение (5).

$$\ddot{X}_2 = -\frac{C_1}{\sin \psi} \cdot e^{-\frac{\sigma}{2} \tau} \cdot \sin(\omega \tau - \psi). \quad (9)$$

Максимальное ускорение будет

$$\ddot{X}'_{2 \max} = \ddot{X}'_2(0) = + C_1. \quad (10)$$

Сравнение рассмотренной системы с некоторыми быстродействующими системами [1—5] позволяет сделать следующие выводы.

1. Систему автоматического регулирования со ступенчатой модификацией входного сигнала можно считать близкой к оптимальной по быстродействию [5].
2. Ступенчатая модификация входного сигнала применима и позволяет получить переходные процессы без перерегулирования в системах с малым демпфированием, склонных к колебаниям и даже находящихся вблизи границы устойчивости.
3. Управляющая часть подобных систем несложна и представляет собой устройство для квантования входного сигнала по уровню.
4. Ступенчатая модификация входного сигнала корректирует переходный процесс подобно корректору, вводящему вторую производную в закон регулирования.

Омский
машиностроительный институт

Поступила в редакцию
22/II 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. М. Уланов, Регулирование по возмущению, М., Госэнергоиздат, 1960.
2. А. Я. Лернер, Принципы построения быстродействующих следящих систем и регуляторов, М., Госэнергоиздат, 1961.
3. Г. М. Островский, Системы автоматического регулирования со скачкообразным изменением параметров. Тр. I Международн. конгресса международной федерации по автоматическому управлению. Теория дискретных, оптимальных и самонастраивающихся систем. Изд-во АН СССР, 1961.
4. Б. Н. Наумов, Синтез нелинейных систем автоматического регулирования. В кн.: «Итоги науки», Технические науки, т. I, Проблемы теории нелинейных систем автоматического регулирования и управления. Изд-во АН СССР, 1957.
5. А. А. Фельдбаум, Вычислительные устройства в автоматических системах, М., Физматгиз, 1959.
6. B. Chatterjee, Improved Transient Response in Servo Systems with Input Modifications, IRE Transactions on automatic control, № 2, 1960.
7. H. C. So, G. J. Thaler, A Modified Posicast Method of Control with Applications to Higher-Order systems, Applications and Industry, № 6, 1960.

Б. А. БАХОВЕЦ, Г. П. ЛЫЩИНСКИЙ

РЕШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ИНВАРИАНТНОСТИ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ

В последнее время значительно расширились теоретические исследования методов построения систем автоматического управления и регулирования электроприводами, позволяющих создавать системы регулирования скорости двигателя инвариантные по отношению к возмущению в виде нагрузки $M_c(t)$ или воспроизводить заданный закон изменения выходной переменной $x_m(t)$ без ошибки. Теоретической базой решения указанных задач в настоящее время является теория инвариантности [1, 2].

Предлагаемый метод дифференцирования основан на том, что инерционность звеньев системы по отношению к одной из переменных можно компенсировать путем дополнительного упреждающего воздействия на вход системы, которое формируется связями по производным от управляющего сигнала или возмущения.

В данной статье показано, что, применяя метод дифференцирования заданных возмущения $M_c(t)$ или желаемого закона изменения выходной координаты $x_m(t)$, получаем те же результаты, что и на основе принципа инвариантности, но объем вычислений при этом значительно уменьшается. Кроме того, метод дифференцирования более прост, доступен и связан с легко представляемой временной плоскостью. В работе также показано, что в некоторых случаях при соответствующем выборе параметров связей по производным порядок правой части уравнения динамики (начальные условия) может быть меньше его левой части и будет справедливым выражение

$$x_{\text{вых}}(t) = k x_{\text{вх}}(t).$$

На рис. 1 приведена структурная схема типовой системы автоматического управления. Постановим задачу определить закон управления, при котором изменение выходной переменной в этой схеме будет происходить по закону $x_m(t)$ без ошибки, при наличии возмущения в виде $M_c(t)$.

В работе [3] показано, что в этом случае закон управления должен выражаться следующим образом:

$$\sum(t) = \frac{x_m(t)}{W(D)} + \frac{M_c(t)}{W_1(D) W_2(D) W_{ob}(D)}, \quad (1)$$

где D — символ операции дифференцирования;

$W(D)$ — полином от D , равный передаточной функции замкнутой системы, в которой s заменено на D .

Из выражения (1) следует, что закон управления должен состоять из двух независимых составляющих: одна должна обеспечивать изменение выходной координаты системы по закону $x_m(t)$, а вторая — компенсировать влияние возмущения $M_c(t)$ на переменную $x_m(t)$.

При этом точное воспроизведение функции $x_m(t)$ возможно лишь в том случае, когда число производных функции $x_m(t)$ равно или больше старшего показателя степени оператора дифференцирования $W(D)$ и старший показатель степени полинома $W_{ob}(D) = W_1(D) W_2(D) W_{ob}(D)$ меньше или равен числу производных зависимости $M_c(t)$.

Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, то будет иметь место переходная составляющая ошибки. Причем ошибка будет тем больше, чем больше число производных будет обращаться в нуль.

Чтобы сравнить результаты предлагаемого метода выбора вида и параметров связей по входному воздействию и возмущению с результатами, получаемыми при помощи теории инвариантности, рассмотрим следящую систему, хорошо изученную В. С. Кулибакиным [1].

Для структурной схемы следящего электропривода (рис. 2), на которую воздействует нагрузочный момент, изменяющийся по гармоническому закону

$$M_c(t) = M_{cM} \sin \omega t,$$

требуется определить вид и параметры связей по возмущению, при которых скорость двигателя будет инвариантной по отношению к нагрузке.

Передаточные функции звеньев системы принимаем равными [1]:

1) усилителя (Y)

$$W_1(s) = \frac{k_1 k_2}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)};$$

2) двигателя (D) по возмущению с учетом моментной муфты (M)

$$W_{2b}(s) = \frac{k k_c}{T_c (T_n s + 1)}.$$

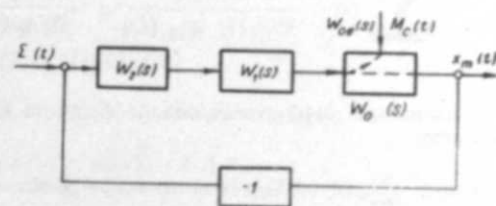


Рис. 1.

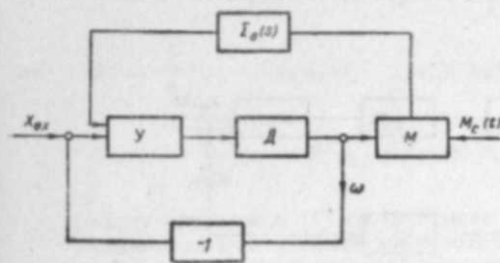


Рис. 2.

Так как на составляющую переходного процесса, вызванную входным сигналом, никаких ограничений не накладывается, то по уравнению (1) находим составляющую закона управления, компенсирующую только влияние нагрузки $M_c(t)$. Таким образом, имеем:

$$\sum_b(t) = \frac{M_c(t)}{W_1(D)W_2(D)} = \frac{M_{cM}T_c}{k_1k_2kk_c} (T_1D+1)(T_2D+1) \times \\ \times (T_3D+1) \sin \omega t.$$

Выполнив дифференцирование функции $\sin \omega t$ в соответствии с выражением (2), находим

$$\sum_b(t) = M_{cM}(\omega A \cos \omega t + B \sin \omega t) = M_{cM}(AD + B) \sin \omega t,$$

где

$$A = \frac{T_c}{k_1k_2kk_c} (T_1 + T_2 + T_3 - \omega^2 T_1T_2T_3);$$

$$B = \frac{T_c}{k_1k_2kk_c} [1 - (T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3)\omega^2].$$

Передаточная функция связей по нагрузочному моменту

$$W_M(s) = \frac{\sum_b(s)}{M_c(s)} = As + B. \quad (3)$$

При дифференцировании функции $M_c(t)$ производные не обращались в нуль, следовательно, передаточная функция $W_M(s)$ обеспечит полную компенсацию возмущения по отношению к скорости двигателя.

Полученное выражение передаточной функции связей по нагрузке и ее параметры полностью совпадают с результатами, приведенными в [1]. При этом объем вычислений значительно сокращается, так как нет необходимости составлять общее уравнение динамики системы и производить сложные преобразования правой части этого уравнения к виду $K(D)$ — изображения.

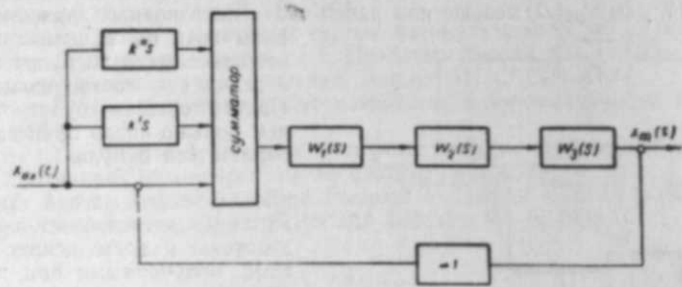


Рис. 3.

В качестве другого примера рассмотрим структурную схему, состоящую из трех звеньев: $W_1(s)$; $W_2(s)$ и $W_3(s)$, охваченных единичной обратной связью (рис. 3). Пусть эта система является устойчивой. Поставим задачу найти величину входного сигнала и коэффициенты связей по его производным, при которых выходная величина будет изменяться по закону

$$x_m(t) = -x_{уст} e^{-\gamma \omega_0 t} \left(\cos \omega_0 \beta t + \frac{\gamma}{\beta} \sin \omega_0 \beta t \right). \quad (4)$$

В работе [3] доказано, что для ряда систем электропривода целесообразно выбирать кривую скорости, являющуюся решением дифференциального уравнения II порядка, поскольку она однозначно определяет величину перерегулирования, время переходного процесса и число колебаний. Кроме того, в той же работе приведены графики кривых $x_m(t)$ в относительных единицах для различных значений коэффициента затухания η и собственной частоты колебаний ω_0 , которые позволяют просто найти коэф-

фициенты η и ω_0 по желаемым показателям качества переходного процесса. Коэффициент $\beta = \sqrt{1 - \eta^2}$.

Так как способ определения параметров связей по нагрузке показан выше, то определим составляющую закона управления, обеспечивающую изменение выходной переменной по закону (4). На основании уравнения (1) можно записать:

$$\sum(t) = \frac{x_m(t)}{1 + W_1(D)W_2(D)W_3(D)} = \frac{x_{уст}}{k} \times \\ \times [a_3 x_m''(t) + a_2 x_m'(t) + a_1 x_m(t) + (1+k)x_m(t)], \quad (5)$$

где $k = k_1k_2k_3$; $a_3 = T_1T_2T_3$; $a_2 = T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3$; $a_1 = T_1 + T_2 + T_3$.

Для реализации зависимости (5) на вход системы необходимо подать управляющее воздействие, равное $x_{уст} \frac{1+k}{k} x_m(t)$, и сумму первых трех его производных, которые можно заменить двумя первыми производными, если коэффициенты усиления дифференцирующих звеньев выбрать следующим образом.

Подставляя в уравнение (5) значение производных функций (4), после преобразования получаем:

$$\sum(t) = \frac{x_{уст}}{k} \left\{ e^{-\gamma \omega_0 t} \left[(a_2 - 2a_3 \omega_0 \eta) \cos \omega_0 \beta t + \right. \right. \\ \left. \left. + (a_3 \omega_0^2 \eta^2 - a_3 \omega_0^2 \beta^2 + a_2 \omega_0 \eta + a_1) \frac{\omega_0}{\beta} \sin \omega_0 \beta t + (1+k)x_m(t) \right] \right\}. \quad (6)$$

Умножая первую производную

$$x_m'(t) = x_{уст} \frac{\omega_0}{\eta} e^{-\gamma \omega_0 t} \sin \omega_0 \beta t$$

на $k' = \frac{1}{k} (a_1 - \omega_0^2 a_3)$, а вторую производную

$$x_m''(t) = x_{уст} \omega_0^2 e^{-\gamma \omega_0 t} \left(\cos \omega_0 \beta t - \frac{\gamma}{\beta} \sin \omega_0 \beta t \right)$$

на $k'' = \frac{1}{k} (a_2 - 2a_3 \omega_0 \eta)$ и подставляя в (5), находим

$$\sum(t) = k'' x_m''(t) + k' x_m'(t) + x_{уст} \frac{1+k'}{k} x_m(t). \quad (7)$$

Закону управления (7) соответствует структурная схема, приведенная на рис. 3.

Можно показать в общем виде, что решением уравнения динамики для полученной структурной схемы и значений параметров связей по производным будет являться исходная зависимость (4).

Замена трех первых производных (в общем случае n производных, где n — порядок дифференциального уравнения динамики системы) возможна лишь потому, что в выражение первой производной исходной зависимости (4) входит только синусоидальная функция. Поэтому коэффициент k'' всегда принимаем равным соотношению коэффициентов, стоящих перед $\cos \omega_0 \beta t$ в уравнении (6), а коэффициент k' должен быть равен соотношению коэффициентов перед $\sin \omega_0 \beta t$ после подстановки в выражение (6) значения $k'' x_m''(t)$.

Таким образом, при определении коэффициентов дифференцирующих звеньев приведенным способом оказывается возможным независимо от вида структурной схемы обеспечить изменение выходной величины по закону вида (4).

Следует отметить, что решенные в данной работе задачи имеют большое практическое значение для рационального конструирования как систем автоматического регулирования, так и систем программного управления, а также при проектировании автоматически управляемых систем по наперед заданным законам.

ЛИТЕРАТУРА

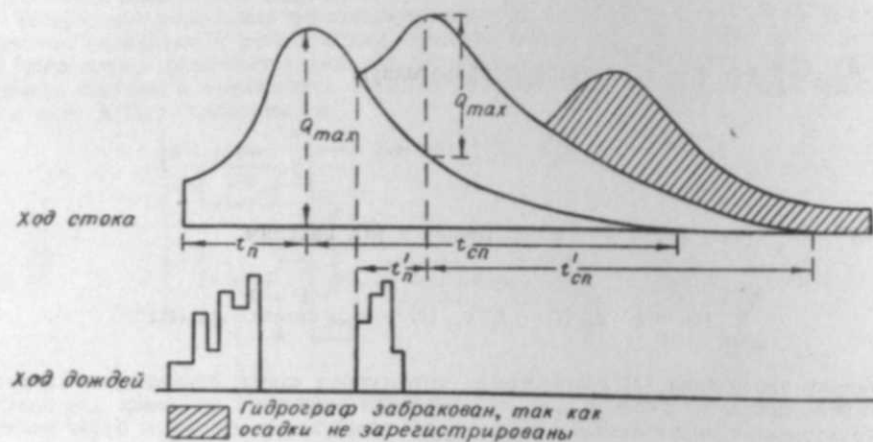
1. В. С. Кулебакин, Об основных задачах и методах повышения качества автоматически регулируемых систем. Тр. II Всесоюз. совещ. по теории автоматического регулирования, т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1955.
2. А. Г. Ивахненко, Определение оптимальных значений варьируемых параметров комбинированных систем регулирования обратным методом. Тр. II Всесоюз. совещ. по теории автоматического регулирования, т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1955.
3. Б. А. Баховец, Г. П. Лышинский, О синтезе линейных систем автоматизированного электропривода в режиме управления. Изв. СО АН СССР, № 1, 1962.

И. Л. ЗИМОНТ

ПРИНЦИПЫ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ДЛЯ МАЛЫХ БАССЕЙНОВ

Генетическая разнородность материалов наблюдений стоковых станций, в которых элементы водного баланса для каждого дождя не выделены, не позволяет непосредственно использовать их при составлении прогнозов и расчете паводков.

Для того чтобы эти материалы могли быть использованы в указанных целях, необходимо определенным образом подготовить их: построить совмещенные хронологические графики выпавших в бассейне дождей и стока в створе бассейна; выделить из многостокных гидрографов* одностокные; определить для них характеристики стока и потерь (значения коэффициентов формы гидрографа, интенсивности впитывания, влажности почвы и др.).



Совмещенные хронологические графики дождей и стока (см. рисунок) позволяют проанализировать качество исходных данных (степень их достоверности) и исключить ненадежные материалы. Признаками последних являются резкое различие между суммарными показаниями плювиографов и соответствующими показаниями осадкомером, несоответствие во времени данных о выпадении дождей, стоке и др.

Совмещенные хронологические графики дождей и стока необходимы и для выделения одностокных гидрографов из многостокных.

Но предварительно нужно разделить генетически разнородные материалы, а точнее, — отделить из гидрографов части, соответствующие межпаводочному стоку (являющемуся по преимуществу результатом подземного питания).

Выявление выклинившихся подземных вод производится сравнением в створе отметок уровней руслового межпаводочного стока с одновременными отметками концов кривых депрессий**. Превышение вторых отметок над первыми покажет, что в этом

* Правильнее гидрограф называть гидрограммой.

** Отметки концов кривых депрессии определяются по соответствующим отметкам уровней в скважинах.

створе подземные воды выклиниваются в русло. Конец выклинивания подземных вод в створе определяется по установлению равенства этих отметок.

Во время паводков, как правило, образуются обратные кривые депрессии. Поэтому паводковый сток возникает в основном в результате поверхностного или внутрипочвенного склонового стока. На гидрографе выклинившийся подземный сток может быть обозначен вертикалями через точки его начала и конца*.

В основу выделения одностокных гидрографов из многостокных могут быть положены следующие принципы (см. рисунок): 1) число выделяемых одностокных гидрографов принимается равным числу пиков многостокного гидрографа; 2) начала второго и последующих выделяемых гидрографов принимаются совпадающими с началами соответствующих паводкообразующих дождей; 3) ординаты выделяемого гидрографа должны с течением времени возрастать, а затем уменьшаться до нуля или (для последнего гидрографа) до расхода, когда начинает выклиниваться подземный сток. При этом максимум гидрографа должен совпадать с соответствующим максимумом многостокного гидрографа. Уменьшение ординат всех выделяемых гидрографов (за исключением последнего) до нуля объясняется отсутствием выклинивания подземного стока в паводковый период; 4) отношения времени подъема и спада всех одностокных гидрографов приближенно** приравняются этому отношению для последнего гидрографа (где оно известно).

Предварительной проверкой правильности выделения одностокных гидрографов из многостокных является естественное соотношение для них объемных коэффициентов стока. При равномерном выпадении дождей, приблизительно постоянном испарении и уровне подземных вод коэффициенты стока должны возрастать от первого к последнему паводку. Интенсивность возрастания коэффициентов стока будет вначале большая, затем меньшая. Нарушение указанных условий влечет за собой необходимость соответствующих поправок в значениях коэффициента стока. Через определение коэффициента стока для всего многостокного паводка (как отношения его объема к суммарному объему дождей, вызвавших многостокный паводок).

Чтобы окончательно проверить правильность выделения одностокных гидрографов из многостокных, нужно вычислить для рассматриваемого периода запасы воды в почве бассейна. Это можно сделать исходя из предлагаемого уравнения баланса потерь

$$V = 1000 \left[\sum_0^{T_1} it_i - (p_2 - p_1) \right] F_0 \text{ м}^3, \quad (1)$$

где $\sum_0^{T_1} it_i$ — сумма слоев потерь (мм) от всех выпавших на бассейн дождей за интервал T_1 (ч) между фактическими определениями влажности почвы бассейна;

p_1 — средний фактический запас воды (мм) в инфильтрующем слое*** почам бассейна в начале интервала T_1 ;

p_2 — то же, в конце интервала T_1 ;

F_0 — площадь бассейна (км²) за вычетом площадей его нефилтрующих частей (озер, болот, бетонированных или асфальтированных поверхностей и т. п.);

V — объем «потерь от потерь» (т. е. объем оттока воды в грунт ниже инфильтрующего слоя и объем испарения с бассейна) за счет T_1 .

В свою очередь

$$V = 1000[(y+z)F_0 + z_1(F - F_0)] \text{ м}^3, \quad (2)$$

где y — слой оттока воды (мм) в грунт ниже инфильтрующего слоя за время T_1 ;

z — слой испарения (мм) с поверхности почвы бассейна за время T_1 ;

z_1 — слой испарения (мм) с нефилтрующих частей бассейна за T_1 ;

F — площадь бассейна (км²).

После нахождения V по формуле (1) можно вычислить p , т. е. средний запас воды в инфильтрующем слое почвы бассейна на какой-либо момент времени.

* Расходы, соответствующие началу и концу выклинивания подземных вод, определяются (при равенстве указанных отметок) по кривой расходов водослива и его отметке.

** С корректировкой на продолжительность и характер изменения интенсивности дождя.

*** Толщина инфильтрующего слоя зависит от рода почвы и вида растительного покрова; она равна глубине первого от поверхности минимума запаса воды в слое почвы или глубине расположения первого водоупора.

Вычисление p производится по следующим формулам: при нахождении p в пределах интервала T_1

$$p = p_1 + \sum_0^T it_1 - \frac{VT}{1000 F_0 T_1} \text{ мм.} \quad (3)^*$$

при нахождении p до интервала T_1

$$p = p_1 - \sum_0^T it_1 + \frac{VT}{1000 F_0 T_1} \text{ мм.} \quad (3a)$$

при нахождении p после интервала T_1

$$p = p_2 + \sum_0^T it_1 - \frac{VT}{1000 F_0 T_1} \text{ мм.} \quad (3б)$$

В этих формулах

T — интервал (α) между фактическим и вычисленным значениями среднего запаса воды в инфильтрующем слое почвы бассейна;

$\sum_0^T it_1$ — сумма слоев потерь (мм) от всех дождей, выпавших на бассейн за время T .

Точность формул (3), (3а) и (3б) зависит от степени постоянства температуры воздуха и почвы в пределах интервалов T_1 и T и от их продолжительности. Наибольшую ошибку можно установить (по С. Н. Крицкому) путем сопоставления вычисленного и фактического значений p на один и тот же момент времени.

Правильность определения $\sum_0^T it_1$ и $\sum_0^T it_1$ зависит от правильности выделения однопиковых гидрографов из многопиковых. Действительно, значение it_1 для каждого дождя определяется из уравнения водного баланса

$$W = 1000 (H_t F - it_1 F_0) \text{ м}^3. \quad (4)$$

где W — объем однопикового паводка (численно равный площади гидрографа);

H_t — слой дождя (мм);

i — интенсивность потерь (впитывания, испарения и др.), средняя по времени и площади бассейна (мм/мин);

t_1 — средневзвешенная по площади стекания продолжительность потерь (мин).

Для облегчения вычисления p следует синхронизировать наблюдения за осадками, стоком, влажностью почвы, испарением с бассейна и другими элементами водного баланса.

Окончательной проверкой правильности выделения однопиковых гидрографов из многопикового является строго линейная зависимость** приведенных запасов воды в почве бассейна от значений междождевых периодов. Для построения таких зависимостей по предложенным выше формулам вычисляются запасы воды в почве бассейна в начале каждого из паводкообразующих дождей (в пределах многопикового паводка) и в конце каждого предшествующего дождя. Затем принимается за основу запас воды в почве на конец какого-либо дождя и вычисляются разности между этой величиной и аналогичными величинами на концы других дождей. Прибавление полученных разностей (со своими знаками) к запасам воды в почве на начала последующих дождей даст количество приведенных запасов.

После выделения однопиковых паводков можно определить для них значения интенсивности потерь, коэффициентов формы гидрографа и др. параметров***.

* Учитывать в формулах (1) и (3) величину F_0 вместо F предложил Н. Н. Морозов (УГМС ДВ).

** Наклон такой прямой для каждого многопикового гидрографа будет пропорционален суммарной температуре почвы бассейна.

*** См. И. Л. Зимонт, Полевые эксперименты по формированию ливневых паводков на малых бассейнах. Амурский сб., вып. II, изд. ДВФ СО АН СССР, 1960.

* * *

Обработка данных наблюдений всех стоковых станций по предлагаемой методике позволит получить большое количество материалов водного баланса*, установить влияние отдельных факторов на процессы формирования паводков, а затем с помощью электронно-счетных машин дать физически обоснованный прогноз или расчет паводков.

Кроме того, в процессе обработки данных наблюдений стоковых станций будут выявлены недостатки в их работе.

Работники Хабаровского института инженеров железнодорожного транспорта (М. Р. Широкова, В. К. Кочнева и др.) и Управления Гидрометеослужбы Дальнего Востока (С. А. Любвиная, В. С. Лапина и др.) под руководством автора уже произвели предлагаемую обработку материалов наблюдений Валдайской гидрологической лаборатории за 1950—1956 гг.

Хабаровский институт
инженеров железнодорожного транспорта

Поступила в редакцию
24/1 1963

В. К. МОРГУНОВ

К МЕТОДИКЕ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЬДА НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

При проектировании гидротехнических сооружений необходимо располагать данными о величине возможных ледовых нагрузок в период весенних ледоходов. Особо важное значение этот вопрос приобретает в условиях сурового климата Сибири и Севера, где ведется грандиозное гидротехническое строительство.

Для определения динамического усилия при ударе льдин о сооружение предложено много расчетных зависимостей, основанных преимущественно на теоретических соображениях. Подсчеты по этим зависимостям дают далеко не согласующиеся между собой результаты. Поэтому, несмотря на совершенствование методов расчета, все же необходима их проверка и уточнение на основании данных измерений в натуральных условиях.

Измерение динамического давления льда на опору моста через Днепр проводилось А. И. Гамаюновым [1] с помощью специальной установки. Для этой же цели К. Н. Коржавиним был предложен кинематический метод, который применялся на реках Сибири [2].

В результате этих измерений определяется полное давление, действующее на сооружение при ударе льдины.

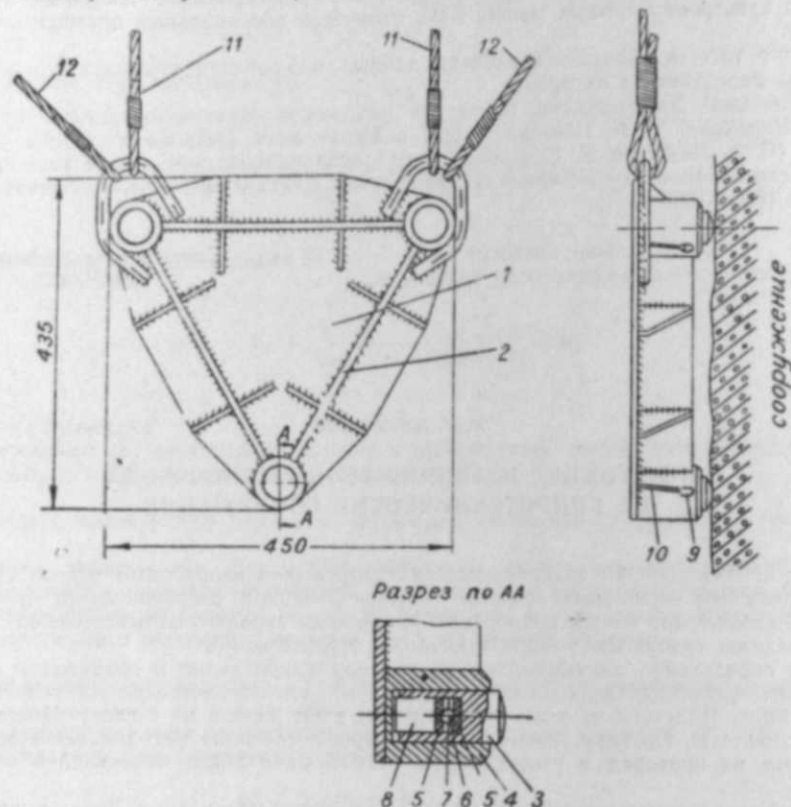
Однако наряду с этим определенный интерес представляет местное усилие в зоне контакта льдины с сооружением. Лабораторией ледотермики Транспортно-энергетического института СО АН СССР под руководством автора были поставлены опыты по измерению усилий при ударе льдин с помощью динамометрической плиты. Работа проводилась на одном из бычков гребени плотины строящейся Красноярской ГЭС на Енисее в период весеннего ледохода 1963 г.

Схема устройства динамометрической плиты представлена на рис. 1. Прибор состоит из лицевой плиты 1, усиленной ребрами жесткости 2. Площадь плиты, воспринимающая ледовую нагрузку, составляет 0,131 м². Давление льда от плиты на сооружение передается через три опоры, в которых расположены инденторные датчики. Датчики находятся в опорных стаканах 3, вставляемых в гнезда плиты 4. Собственно датчик состоит из двух круглых пластинок (образцов) 5 диаметром 25 мм и толщиной 6 мм, между которыми зажат стальной закаленный шарик (индентор) 6 диаметром 7,9 мм. Пластины изготавливались из стали марки Ст. 2. Для удержания шарика в центре пластинок он закрепляется в специальной шайбе 7. Усилие на датчик передается через боек 8. Для предварительного сжатия датчика и предотвращения выпадения его из плиты через отверстие 9 пропускается контрольная проволока 10.

Вес плиты в рабочем состоянии составляет 25 кг. Она опускается на тросах 11 и оттяжках 12.

* Отсутствие на стоковых станциях регистрации исторических максимумов может быть частично компенсировано данными по искусственному дождеванию целых бассейнов.

Бычки плотины, на которых производились опыты, имели вертикальные ледорезные части криволинейного в плане очертания. Плита устанавливалась на боковую поверхность ледореза вблизи режущего ребра (рис. 2). При приближении выбранной льдины плита опускалась в рабочее положение под уровень воды. Если первая льдина ударяла не очень сильно, то допускались удары и последующих, более прочных льдин. Всего



Разрез по АА

Рис. 1. Схема устройства динамометрической плиты.

допускалось 3—5 ударов при каждом спуске плиты. После этого ее поднимали на площадку бычка, делали перезарядку пластинок и снова опускали в воду.

Опытам благоприятствовала значительная косина течения — до 15—20° к оси бычков. Поэтому удары льдин происходили почти по нормали к поверхности бычка и плита находилась в зоне дробления льда.

Одновременно с определением силы удара льдин производилась их съемка фотограмметрической камерой [3]. По материалам съемки были получены данные о размерах льдин и скоростях их подхода к бычкам.

В результате опытов для каждого погружения плиты было получено три пары образцов с отпечатками шариков, по диаметру которых определялась сила удара. По вдавлению шарика в образцы на испытательной машине была установлена зависимость между диаметром отпечатка и величиной вдавливающей силы при статическом нагружении. Окончательное усилие получалось с учетом динамичности приложения нагрузки

$$P = K_d \cdot P_{ст},$$

где $P_{ст}$ — усилие по статической тарировке;

K_d — динамический коэффициент.

Согласно опытам Б. С. Иоффе и Ф. Ф. Витмана, для Ст. 2 при скорости удара до 2 м/сек динамический коэффициент равен 1,16 [4]. Эта величина и была нами принята.

В данном случае на каждую зарядку образцов (комплект из трех пар пластинок) допускались удары нескольких льдин. Поэтому нужно было оценить увеличение размеров (разбивание) отпечатков на образцах при повторных ударах. С этой целью были поставлены опыты по многократному ударному нагружению датчиков на специальном вертикальном копре. Опытами установлено, что при том количестве ударов (не более 5),

которое имело место во время измерения ледовой нагрузки на сооружение, разбивание не оказывает существенного влияния на точность результатов.

Весна 1963 г. в районе строительства Красноярской ГЭС имела затяжной характер. Сравнительно низкие температуры воздуха в апреле и низкие уровни воды в Енисее обусловили позднюю дату вскрытия реки — 2 мая — при средней многолетней дате 27 апреля.

Ледяной покров к началу ледохода заметно ослабел. Однако на верховом участке реки, примыкающем к сооружению, лед отличался большой толщиной (до 1,5—2 м) и значительной прочностью по сравнению с прочими участками реки. Это явилось результатом местных условий формирования ледяного покрова на данном участке в осенне-зимний период.

Во время ледохода к прорези верхней перемычки подходили крупные ледяные поля, которые разламывались на перепаде в районе затопленного котлована так, что представилось возможным наблюдать удары о бычки сравнительно небольших льдин размером 10×10 м, иногда 25×25 м. Скорость подхода льдин к сооружению составляла от 4,5 до 5 м/сек. Удары льдин были резкими и производили сотрясение бычков.

За время ледохода произведено 15 спусков динамометрической плиты и соответственно этому получено такое же количество комплектов образцов с отпечатками шариков. При ударе льдин о бычок плита находилась в зоне дробления льда. Поэтому по фактическому усилию, приходящемуся на плиту, можно было определить удельное давление, при котором происходило дробление льда,

$$R_{пл} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\omega},$$

где P_1 P_2 P_3 — усилие в каждом датчике;
 ω — площадь плиты.

Результаты измерений

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Усилие на плиту, т	3,6	4,6	6,0	4,4	3,4	2,9	1,8	4,7	5,5	11,9	9,4	7,4	3,4	4,2	8,3
Удельное давление, кг/см ²	2,7	3,5	4,6	3,4	2,6	2,2	1,4	3,6	4,2	9,1	7,1	5,6	2,5	3,2	6,4

Из таблицы видно, что наименьшее удельное давление составляло 1,4 кг/см², наибольшее — 9,1 кг/см², среднее — 4,1 кг/см².

Приведем полученные результаты к кубиковой прочности льда для размера образцов 8×8×8 см. Для этого следует учесть, что дробление льда при измерении динамометрической плитой происходит в условиях местного смятия, эффект которого по предложению К. Н. Коржавина можно учесть коэффициентом 2,5 [2]. Кроме этого, нужно иметь в виду масштабный эффект. Согласно экспериментальным данным И. П. Буягина, при переходе от сечения образца 8×8 см, принятого за исходный, к площади плиты 0,131 м² коэффициент, учитывающий уменьшение прочности, составляет 0,7 [5]. Тогда приведенную кубиковую прочность получим, поделив значения удельных давлений по динамометрической плите на коэффициент 2,5 · 0,7 = 1,75. Выполнив деления, получим следующие значения: мин. 0,8 кг/см², макс. 5,2 кг/см², средн. 2,3 кг/см². Сопоставим эти результаты с данными опытов по статическому сжатию кубиков льда размером 8×8×8 см. Опыты проводились в районе Красноярской ГЭС лабораторией ледотермики ТЭИ СО АН СССР в предледоходные периоды 1960 и 1961 гг. По испытаниям 11 апреля 1960 г. за три дня до ледохода средняя по толщине ледяного

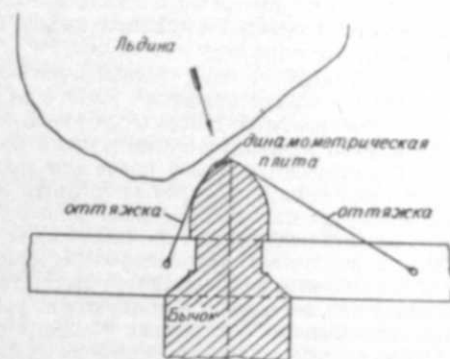


Рис. 2. Положение динамометрической плиты на бычке при измерении ледовой нагрузки.

покрова величина предела прочности составила: мин. $5,4 \text{ кг/см}^2$, макс. $11,7 \text{ кг/см}^2$, средн. $9,1 \text{ кг/см}^2$. По испытаниям 12 апреля 1961 г. (при дате начала ледохода 23 апреля) были получены следующие значения: мин. $5,5 \text{ кг/см}^2$, макс. $8,5 \text{ кг/см}^2$, средн. $6,7 \text{ кг/см}^2$.

Как видно, эти величины значительно больше удельного разрушающего давления, полученного при измерениях динамометрической плиты меньше, нежели при статической нагрузке.

Предложенная нами динамометрическая плита является сравнительно простым и надежным в работе прибором. Работа по определению ледовой нагрузки может проводиться независимо от погодных условий, а также в ночное время. Полученные в результате опытов пластинки с отпечатками являются документальным материалом.

Определение удельной прочности льда с помощью динамометрической плиты имеет ряд преимуществ по сравнению со статическими испытаниями небольших образцов и, во всяком случае, является хорошим дополнением к ним. Преимущества нового прибора заключаются в следующем: прочность льда определяется непосредственно в период ледохода; в результате рекомендуемых измерений возрастает вероятность обнаружения наибольших значений прочности льда, так как через сооружение проходит не только местный лед, но и лед с вышележащих участков реки. И что особенно важно, прочность льда определяется в натуральных условиях работы сооружения по разрушению ледяных полей (натурные скорости движения льдин, явление местного смятия и т. д.).

Транспортно-энергетический институт
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
17/VII 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Гамаюнов, Определение давления льда на опоры мостов в натуральных условиях. Техника железных дорог, № 4 и 12, 1947.
2. К. Н. Коржавин, Воздействие льда на инженерные сооружения. Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1962.
3. В. К. Моргунов, Новая методика определения скорости движения льдин и их размеров методами фотограмметрии. Тр. ТЭИ СО АН СССР, вып. XI. Новосибирск, 1961.
4. Ф. Ф. Витман, Б. С. Иоффе, Простой способ нахождения динамической твердости металлов с помощью двухстороннего конуса. Заводская лаборатория, № 6, 1948.
5. И. П. Бутягин, Прочность ледяного покрова в ледовых нагрузках на гидросооружения. Тр. ТЭИ СО АН СССР, вып. XI. Новосибирск, 1961.

М. П. БОЛШТЯНСКИЙ, А. В. ЛИНЦЕР, Ю. В. СОКОЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ДВУХСЛОЙНОМ ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ

В настоящее время для расчета напряжений в двухслойных грунтовых основаниях при работе их в первой фазе напряженного состояния («упругой») разработаны две принципиально отличающиеся расчетные схемы. Первая построена на основе решения теории упругости для слоистого полупространства [1], вторая — на основе теории дискретного распределения напряжений [2]. В то же время вопрос о фактическом распределении напряжений исследован недостаточно.

Рассматривая основные предпосылки двух упомянутых теорий, мы предлагаем в качестве основного критерия для отнесения конкретного двухслойного грунтового основания к первой или второй расчетной схеме принять способность грунта верхнего слоя воспринимать растягивающие усилия.

Так, если грунт верхнего слоя обладает способностью воспринимать растягивающие усилия, двухслойную систему следует рассчитывать по теории упругости. Если же верхний слой не способен сопротивляться растяжению, грунтовое основание должно рассчитываться по дискретной теории.

С целью установления действительности предлагаемого критерия, а также изучения фактического распределения напряжений экспериментальному исследованию были подвергнуты три типа распространенных двухслойных оснований. При этом нижний слой во всех случаях был один и тот же — уплотненный глинистый грунт «бесконечной» мощ-

ности. Грунт верхнего слоя варьировался: применялись уплотненный песок, щебень и обработанный битумом глинистый грунт.

В соответствии с выдвинутым критерием предполагалось, что распределение напряжений в первом и втором случаях будет соответствовать теории дискретного распределения напряжений, а в третьем — теории упругости.

Как показывают непосредственные вычисления, существенное расхождение результатов расчетов двухслойной системы по дискретной теории при коэффициентах распределительной способности слоев $L=0,37$ и по теории упругости начинается при разнице модулей упругости слоев не менее чем в три раза. В связи с этим для получения четких результатов при проведении опытов мы стремились достигнуть величины отношения модуля упругости нижнего слоя E_0 к модулю упругости верхнего слоя E_1 не более 0,3.

Опыты были поставлены в полевых условиях. Экспериментальный лоток в естественном глинистом грунте с размерами в плане $5 \times 25 \text{ м}$ и глубиной $1,6 \text{ м}$ устраивался следующим образом. Грунт разрабатывался экскаватором и разравнивался бульдозером в непосредственной близости от котлована. Определялась влажность грунта и добавлялось необходимое для достижения заданной влажности (0,7 от предела текучести) количество воды. Затем грунт подавался бульдозером в лоток, планировался и укатывался автогрейдером слоями толщиной $12-15 \text{ см}$ до максимально достижимой плотности. Верхняя часть лотка была засыпана 25 см слоем влажного песка для предотвращения испарения из грунта лотка. Песок периодически поливался, чтобы сохранить влажность на заданном уровне.

Электротензометрические динамометры, предназначенные для измерения вертикальных напряжений [3], закладывались после окончания укатки в грунт лотка, для чего бурились скважины диаметром 7 см и глубиной до 20 см . Скважины располагались на одной прямой, перпендикулярной продольной оси лотка, на расстоянии 30 см одна от другой. Извлеченный буром грунт вновь запрессовывался в скважину послойно с помощью специального пресса. Чувствительность динамометров колебалась от $0,01$ до $0,004 \text{ кг/см}^2$.

Нагрузка прикладывалась к поверхности экспериментальных площадок через гибкий штамп (заключенную в цилиндрическую обойму с поршнем резиновую камеру с водой). Применялись гибкие штампы диаметром $25, 20$ и 15 см .

Давление на поршень создавалось гидравлическим домкратом, который упирался сверху в подвешенную над площадкой балку. При этом величина нагрузки подбиралась таким образом, чтобы напряжения в грунтовом основании были меньше тех, которым оно подвергалось в процессе укатки. Это обеспечивало работу экспериментальной площадки в «упругой» стадии.

Модуль упругости двухслойного грунтового основания («эквивалентный» модуль упругости) и отдельных его слоев определялся по упругим осадкам круглого жесткого штампа; штамп вдавливался последовательно в двухслойные основания и монолиты, устроенные из тех же материалов, что и основания. При этом давление на монолит соответствовало давлению, передававшемуся на данный материал в двухслойном основании.

После уплотнения нижнего слоя и закладки динамометров в лотке устраивались секции — экспериментальные площадки с соответствующим верхним слоем. Размер экспериментальной площадки в плане — $2 \times 5 \text{ м}$. В тех случаях, когда верхний слой состоял из щебня или битуминизированного грунта, песок с экспериментальной площадки убирался. Песок и битуминизированный грунт уплотнялись пневмокатком, а щебень — катком с жесткими вальцами. Толщина верхних слоев составляла $18-25 \text{ см}$.

Перед началом серии основных измерений производилось 10-кратное приложение максимальной нагрузки с помощью гибкого штампа, который ставился на поверхность площадки по вертикали над каждым динамометром. Не вызывая местного изменения свойств слоев (величина нагрузки, как указывалось выше, была значительно меньше уплотняющего давления при укатке), это обеспечило в дальнейшем устойчивое взаимодействие между динамометром и окружающим его грунтом: при повторных нагрузках отсчеты по динамометрам оставались неизменными.

Серия основных измерений производилась следующим образом. Гибкий штамп выбранного диаметра устанавливался по оси над левым крайним динамометром, и двумя ступенями давалась нагрузка с разгрузкой после каждой ступени и взятием отсчетов по динамометрам. Выдержка нагрузки составляла одну минуту. Затем штамп переставлялся на 15 см вправо и вновь проводились нагружения со взятием отсчетов. Эта операция повторялась до тех пор, пока вследствие удаления нагрузки от динамометров последние не переставали реагировать. Во всех случаях при удалении нагрузки от динамометров удалось надежно зафиксировать напряжения более 1% от осевых.

На основании полученных данных строилась объемная эпюра вертикальных напряжений в показаниях каждого динамометра и определялся его тарировочный коэффициент T_k по способу «объемной эпюры» [4]. С помощью полученных таким образом коэффициентов T_k показания динамометров были переведены в напряжения.

Некоторые характерные результаты исследования двухслойных оснований с верхним слоем из песка и щебня приведены на рис. 1. Здесь по вертикали отложена глубина от границы раздела слоев в долях радиуса нагруженного круга, по горизонтали — бина от границы раздела слоев в долях радиуса нагруженного круга, по горизонтали — относительная величина вертикального напряжения по оси действия нагрузки. Кривая I соответствует теоретическим напряжениям по дискретной теории [2] при коэффициенте распределительной способности обоих слоев $L_1=L_0=0,375$.

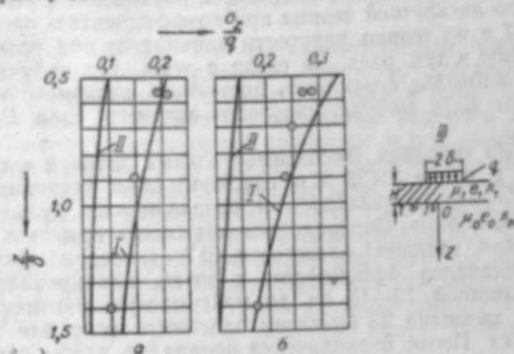


Рис. 1. Сопоставление данных теории и эксперимента:

а) для площадки с верхним слоем из песка $H=25$ см, $\delta=12,5$ см, $E_2: E_1=0,16$, $\mu_2=0,35$, $\mu_1=0,25$, $L_0=L_1=0,375$; I — кривая по дискретной теории, II — кривая по теории упругости, III — схема эксперимента; б) для площадки с верхним слоем из щебня: $H=18$ см, $\delta=12,5$ см, $E_2: E_1=0,07$, $\mu_2=0,35$, $\mu_1=0,25$, $L_0=L_1=0,375$, остальные обозначения те же, что и на рис. 1, а.

Величина этого коэффициента для уплотненного связного грунта (L_0) взята по данным ранее проведенного исследования [3]. Как явствует из взаимного расположения теоретической кривой I и экспериментальных точек, они весьма близки (средне-квадратичное отклонение экспериментальных точек от теоретической кривой — 4,5%), что позволяет принять коэффициент L_1 для уплотненного песка и щебня также равным 0,375.

Для сопоставления приведены кривые (II) по теории упругости [1].

Типичные результаты измерения напряжений в двухслойном основании с верхним слоем из битуминизированного грунта изображены на рис. 2.

Рисунки показывают, что расположение экспериментальных точек по отношению к теоретическим кривым получилось весьма характерным. На опытных секциях, где верхний слой был представлен грунтом, не воспринимавшим растягивающих усилий (песок, щебень), распределение фактических напряжений соответствовало дискретной теории; там, где верхний слой воспринимал растягивающие усилия (битуминизированный грунт), распределение соответствовало теории упругости.

Таким образом, данные экспериментального исследования подтвердили правильность выдвинутого критерия для выбора теоретических расчетных схем реальных двухслойных грунтовых оснований.

Выводы

1. Распределение напряжений в двухслойном грунтовом основании с верхним слоем из уплотненного песка или щебня и нижним из уплотненного связного грунта при работе в первой фазе напряженного состояния соответствует данным теории дискретного распределения напряжений при коэффициентах распределительной способности всех слоев 0,375.

2. Распределение напряжений в двухслойном грунтовом основании с верхним слоем из битуминизированного связного грунта и нижним из уплотненного суглинка при работе в первой фазе напряженного состояния соответствует теории упругости.

3. Основным критерием для выбора теоретической расчетной схемы реального двухслойного грунтового основания является способность материала верхнего слоя воспринимать растягивающие усилия.

Транспортно-энергетический институт
Сибирского отделения АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
11/11 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Коган, Напряжения и деформации многослойных покрытий. Тр. ХАДИ, вып. 14, изд. ХГУ, Харьков, 1953.
2. И. И. Кандауров, Теория дискретного распределения вертикальных напряжений и деформаций сжатия в однородных и многослойных грунтовых основаниях военно-транспортных и других сооружений, Л., 1959.
3. М. П. Болштынский, Исследование вертикальных напряжений в трехфазном грунте под жестким штампом, Изв. СО АН СССР, № 6, 1960.
4. М. П. Болштынский, Экспериментальное исследование напряжений в неоднородной сыпучей среде, «Основания, фундаменты и механика грунтов», № 6, 1962.

Ю. Д. ТРОПИИ, Э. К. ЯКУБАЙЛИК

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ НИТЕВИДНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ЖЕЛЕЗА

В последние годы внимание многих исследователей привлекают так называемые «усы» — нитевидные кристаллы металлов и их окислов [1, 2], обладающие высокосовершенной кристаллической решеткой [3, 4]. Из всего многообразия получаемых усов наибольший интерес, естественно, представляют правильные монокристаллы и, в частности, для теории ферромагнетизма — нитевидные монокристаллы никеля, кобальта и железа.

В ферромагнитных материалах качество кристаллической решетки сказывается прежде всего на таких структурно чувствительных свойствах, как восприимчивость, коэрцитивная сила и гистерезисные потери. Поэтому, например, усы железа обладают многими необычными для массивных ферромагнетиков свойствами.

Наблюдения за движением доменных границ в усах железа коллоидальным магнетитовым методом показывают, что коэрцитивная сила для движения существующей доменной границы меньше чем 0,008 э, тогда как поле, необходимое для образования зародышей обратной намагниченности при перемагничивании нитевидного кристалла,

приближается в отдельных его участках к полю анизотропии $H = \frac{2k}{I_s}$, которое для железа равно 530 э [5]. Максимальная величина скорости движения доменной границы, полученная при импульсном перемагничивании усов железа [6], достигает 50 км/сек, что в сотни раз больше скоростей, полученных в классическом эксперименте Сикстуса и Тонкса [7] на растянутых железоникелевых проволоках.

Возможность изучить магнитные свойства кристаллов железа на таких почти идеальных материалах и связать результаты исследований с совершенством кристаллической решетки, используя основные положения теории дислокаций, и побудила нас поставить настоящую работу.

Усы железа, получаемые по методу Бреннера [8], растут трех типов — в направлении [100], [110] и [111]. Усы типа [100] имеют поперечное сечение в форме квадрата и вдоль длины ограничены поверхностями (100). Усы типа [110] вдоль длины имеют две законченные поверхности (100) и две далеко не достроенные ступенчатые поверхности. Усы типа [111] в поперечном сечении дают правильный шестиугольник, вдоль направления роста ограничены поверхностями (110) и в вершине уса имеют три сходящиеся к центру грани куба. Поверхности усов обычно являются оптически зеркальными плоскостями. Длина усов колеблется от долей миллиметра до 30 м, диаметр — от 1 до 500 мк. За диаметр принимается расстояние между двумя противоположными гранями, параллельными направлению роста уса.

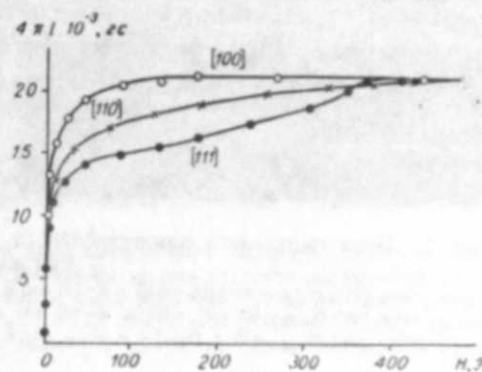


Рис. 1. Типичные кривые намагничивания трех типов усов железа диаметром 200—300 мк.

Усы типа [111] в поперечном сечении дают правильный шестиугольник, вдоль направления роста ограничены поверхностями (110) и в вершине уса имеют три сходящиеся к центру грани куба. Поверхности усов обычно являются оптически зеркальными плоскостями. Длина усов колеблется от долей миллиметра до 30 м, диаметр — от 1 до 500 мк. За диаметр принимается расстояние между двумя противоположными гранями, параллельными направлению роста уса.

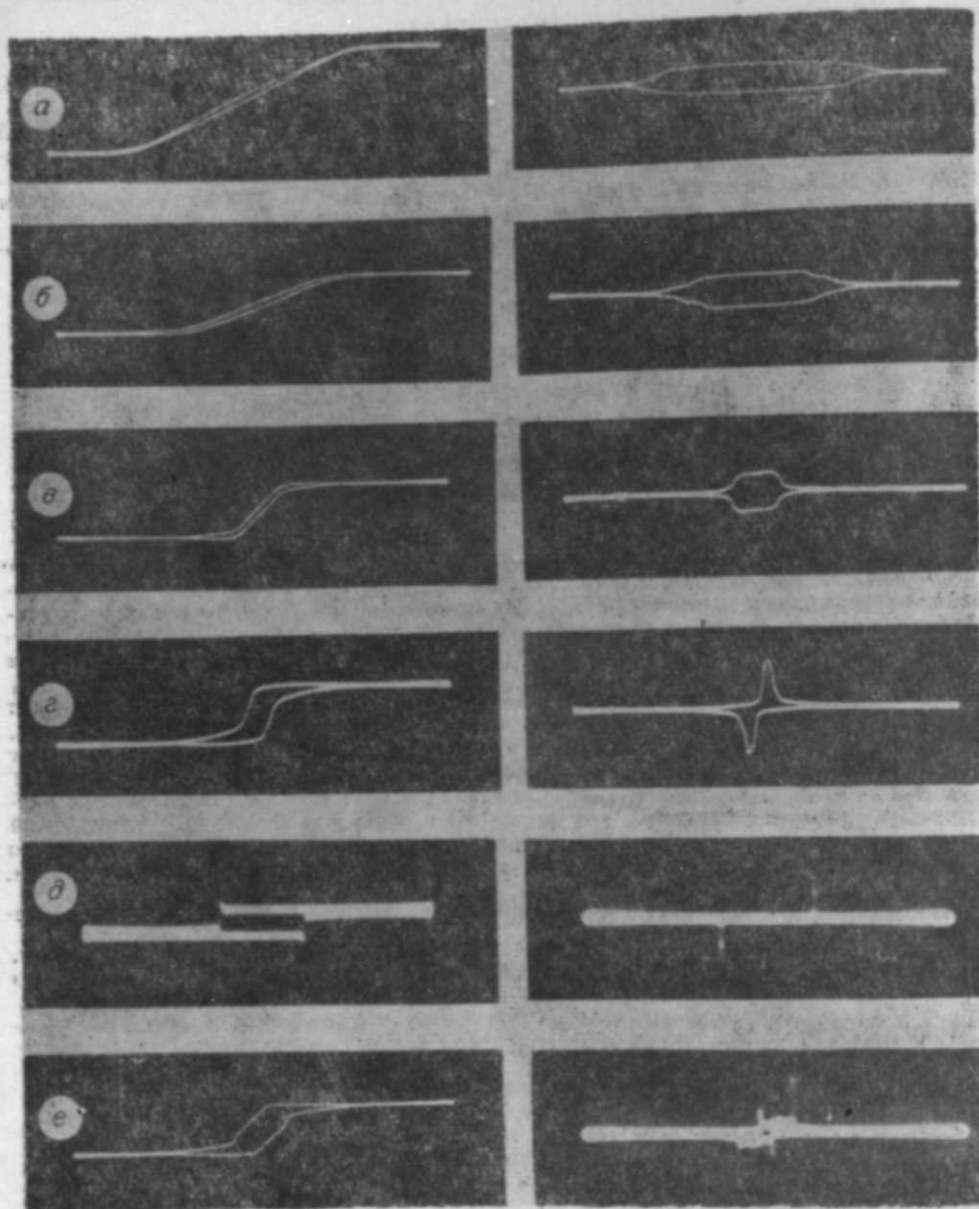


Рис. 2. Петли гистерезиса намагниченности (слева) и динамической восприимчивости усов железа:

а — ус типа [111], $H_{\max}=40$ э, $H_c=0,37$ э, $d=120$ мк; б — ус типа [110], $H_{\max}=40$ э, $H_c=0,40$ э, $d=143$ мк; в — ус типа [100], $H_{\max}=40$ э, $H_c=0,5$ э, $d=200$ мк; г — ус типа [100], $H_{\max}=55$ э, $H_c=3,2$ э, $d=24$ мк; д — ус типа [100], $H_{\max}=34$ э, $H_c=7,4$ э, $d=6$ мк; е — ус типа [100], $H_{\max}=50$ э, $H_c=3,3$ э, $d=35$ мк.

Было исследовано около 150 усов железа, растущих по трем главным направлениям. Кривые намагничивания сняты на баллистической установке при перемещении контейнера с образцом из одной искательной катушки в другую. Катушки были сбалансированы и включены в противофазе.

Типичные кривые намагничивания трех типов усов диаметром 200—300 мк показаны на рис. 1. Характер кривых, величина намагниченности насыщения и значения полей насыщения для каждого типа кривых такие же, как и для обычных монокристаллов железа.

Петли гистерезиса намагниченности и динамической восприимчивости (рис. 2) сняты на осциллографической установке при частоте перемагничивания $f=200$ гц. Ка-

нал усиления сигнала $E \sim \frac{dI}{dt}$ давал возможность пропускать без искажений и инте-

рировать импульсы длительностью от 5 до 40 мксек. При исследовании усов с прямоугольной петлей гистерезиса использовался широкополосный усилитель УШ-10.

На рисунках 2, а, 2, б и 2, в показаны петли гистерезиса довольно толстых усов, выросших вдоль кристаллографических направлений [111], [110] и [100] соответственно. С уменьшением диаметра усов происходит качественное изменение их магнитных свойств. На рисунках 2, г, 2, д и 2, е показаны петли гистерезиса усов типа [100] различного диаметра. По мере уменьшения диаметра усов коэрцитивная сила их возрастает, а время перемагничивания уменьшается, и при диаметрах уса порядка нескольких микронов его петля гистерезиса превращается в прямоугольную. Показанная на рис. 2, д всплеск в районе поля старта. Это произошло из-за неполного интегрирования наиболее высокочастотной части спектра сигнала. Время перемагничивания этого уса после достижения поля старта равно двум микросекундам.

На усах типа [110] и [111] при уменьшении диаметра наблюдается иная закономерность. Коэрцитивная сила их уменьшается, и для тонких усов петля вырождается в прямую линию.

Одна из партий полученных усов была подвергнута отжигу в вакууме $1,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. при температуре 950°C в течение 6 ч с последующим охлаждением со скоростью 2° в минуту. Как правило, отжиг не оказывает заметного влияния на петлю гистерезиса. Только в том случае, когда ус предварительно значительно деформирован, что выражается в появлении многоступенчатых петель гистерезиса (рис. 2, е), отжиг приводит к нормализации петель.

Это понятно, так как усы железа растут свободными от напряжений. Внешние напряжения накладываются только при отделении уса от стенки ванночки, на которой он вырос. Но, как показывают результаты травления поверхностей усов в 2%-ном спиртовом растворе азотной кислоты, ямки травления появляются на расстоянии до 2—5 d вдоль длины уса от места среза (d — диаметр уса). Таким образом, область деформации достаточно мала по сравнению со всем объемом образца. Однако для очень тонких почти совершенных усов, обладающих прямоугольными петлями гистерезиса, даже эти напряжения играют заметную роль. Де Блоис [6] установил, что волна перемагничивания в тонком усе всегда возникает у его срезанного конца, распространяясь затем по длине. Таким образом, деформированная часть уса является местом зарождения областей обратной намагниченности, облегчая процесс перемагничивания и уменьшая коэрцитивную силу.

Коэрцитивная сила усов железа имеет явно выраженную зависимость от их диаметра (рис. 3). Для усов диаметром от 500 до 50—60 мк она остается постоянной. При дальнейшем уменьшении диаметра коэрцитивная сила усов типа [100] начинает постепенно возрастать и при диаметрах, меньших 10 мк, достигает 8—10 э. Коэрцитивная сила усов типа [110] и [111] с уменьшением диаметра, напротив, уменьшается, стремясь при очень малых диаметрах к нулю.

Усы железа растут в результате диффузии атомов металла, адсорбирующихся на поверхности. Такой механизм роста предполагает наличие у мигрирующего конца уса непрерывной ступеньки роста, которая осуществляется винтовой дислокацией. Первоначальный рост усов происходит в длину при малых диаметрах. В тонких усах присутствует только необходимый минимум винтовых дислокаций, поэтому такие усы являются почти совершенными, приближаясь по своим свойствам к идеальным кристаллам. Из-за отсутствия искажений кристаллической решетки происходит задержка образования зародышей перемагничивания и, как следствие этого, возрастание коэрцитивной силы усов типа [100]. После возникновения областей обратной намагниченности образовавшиеся доменные границы быстро проходят по всему объему образца, почти не встречая препятствий. Малое число потенциальных барьеров, которые проходит доменная граница, создает возможность возникновения одного большого скачка Баркгаузена и тем самым большой скорости перемагничивания.

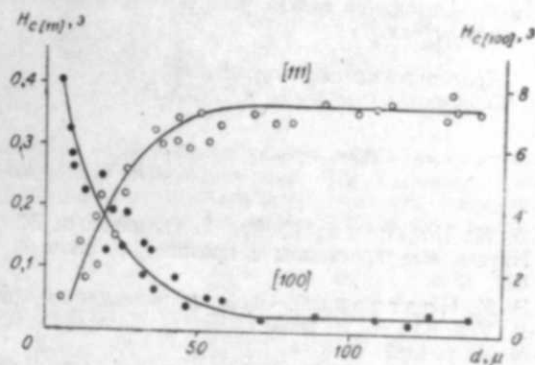


Рис. 3. Зависимость коэрцитивной силы усов железа типа [100] и [111] от их диаметра.

В усах типа [111] и [110] малого диаметра задержка образования областей обратной намагниченности приводит к тому, что энергетически более выгодным становится осуществление процесса перемагничивания посредством вращения вектора спонтанной намагниченности. Поэтому в таких усах преобладает процесс вращения и, как следствие этого, происходит уменьшение коэрцитивной силы.

Дальнейшее увеличение диаметра усов железа происходит как результат слоистого роста, что неизбежно приводит к возникновению новых дислокаций. Именно этим и объясняется качественное отличие свойств тонких усов от усов значительного диаметра. Последние по своим свойствам приближаются к обычным монокристаллам железа.

В связи с тем, что тонкие усы железа, кристаллизующиеся вдоль направления [100], обладают прямоугольной петлей гистерезиса и большой скоростью перемагничивания, значительный интерес для теории ферромагнетизма представляют дальнейшие исследования в этом направлении. Особенно перспективными являются такие вопросы, как связь коэрцитивной силы и закона приближения к насыщению с плотностью дислокаций, эффект Баркгаузена и прямоугольность петли гистерезиса, взаимодействие границ доменов с дислокационной структурой. Полезно также выяснить вопрос о возможности использования тонких усов железа в качестве элементов памяти в счетно-решающих устройствах.

Красноярский институт физики
Сибирского отделения АН СССР

Поступила в редакцию
27/VIII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. М. Надгорный, Ю. А. Осипьян, М. Д. Перкас, В. М. Розенберг. Нитевидные кристаллы с прочностью, близкой к теоретической. УФН, 67, 4, 625—662, 1959.
2. Э. М. Надгорный, Свойства нитевидных кристаллов. УФН, 77, 2, 201—227, 1962.
3. R. V. Coleman. Observation of dislocation in iron whiskers. J. Appl. Phys., v. 29, N. 10, p. 1487, 1958.
4. E. W. Muller. Observation of paired screw dislocations in iron whiskers. J. Appl. Phys., v. 30, N. 11, p. 1843, 1959.
5. R. W. DeBlois, C. P. Bean. Nucleation of ferromagnetic domains in iron whiskers. J. Appl. Phys., Suppl. to v. 30, N. 4, p. 225, 1959.
6. R. W. DeBlois. Domain wall motion in metals. J. Appl. Phys., v. 29, N. 3, p. 459, 1958.
7. K. J. Sixtus, L. Tonks. Phys. Rev., v. 37, p. 930, 1931.
8. S. S. Brenner. The growth of whiskers by the reduction of metal salts. Acta Metallurgica, v. 4, N. 1, p. 62, 1956.

Н. В. КОТЕЛЬНИКОВ, Н. А. КОРЕНЕВ, П. А. МАЛИНЕН, Т. Д. ЕРМОЛИНА

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ НИКЕЛЯ, ПОЛУЧАЕМОГО ХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Осадки никеля, получаемые химическим методом, обладают сложным строением, обусловленным наличием в них фосфора [1]. Магнитные и другие свойства осадков определяются их внутренним строением (структурой). По данным ряда исследований, проведенных различными методами [1, 2], осадки химически восстановленного гипофосфитом никеля в исходном состоянии имеют аморфное строение, которое при соответствующей тепловой обработке переходит в кристаллическое. Согласно проведенным недавно рентгеноструктурным исследованиям [3], осадки в исходном состоянии могут иметь не только аморфную, но и кристаллическую структуру, кроме того, авторы отмечают, что полученные ими образцы с кристаллической структурой обладали ферромагнитными свойствами, аморфные же не обладали.

В настоящей работе, на основе предыдущих исследований [3—5], получены образцы с ферромагнитными свойствами, которые, как показали рентгеновские исследования, в исходном состоянии обладают кристаллическим строением в соответствии с данными [3]. На полученных образцах изучено влияние отжига на ферромагнитные свойства и структуру осадков.

Получение образцов и результаты исследования

Форма образцов и методика магнитных исследований были такими же, как в работах [3—5]. Одновременно с образцами для магнитных исследований получались образцы осадков никеля на медных проволочках диаметром 0,6 мм и плоских медных пластинках для рентгеноструктурных исследований. Чтобы получить более толстый и

Таблица 1

Серия	Состав ванны, г/л			Температура осаждения, °С	Время получения осадка, мин.	Средняя толщина, мк		
	никель серно-кислая	гипофосфит натрия	натрий уксусно-кислый			осадка	исходных образцов	
							I_m , эс/Гс, °	H_c , э
a	30	10	15	85	20	3,5		
b	10	10	10	85	20	4,5	26,8	19,3
в	20	10	10	85	20	4,5	52,1	15,4
г	30	10	8	85	20	6	91,8	9,2

более однородный в магнитном отношении слой осадков, ванна через каждые пять минут работы заменялась свежеприготовленной того же состава. Как отмечалось ранее [3—5], увеличение толщины пленок дает возможность повысить точность магнитных измерений и получить среднее значение результатов из тех, которые были бы у нескольких образцов, полученных при одинаковых условиях без смены раствора.

В табл. 1 приведены данные по четырем сериям образцов. Каждая серия состоит из четырех образцов, полученных из ванны одного состава и обладающих в исходном состоянии одинаковыми магнитными свойствами и строением. О магнитных свойствах образцов можно судить по петлям гистерезиса, приводимым на рис. 1, петли a—1, б—1, в—1, г—1 соответствуют исходным образцам серий a, б, в, г табл. 1.

Отжиг образцов ведет к изменению их магнитных свойств. Петли 2—4 соответствуют однократному выдерживанию исходных образцов в течение 30 мин при температурах 200, 400 и 600°С. Петли снимались при комнатной температуре в поле 50 эс с амплитудой поля 84 э, которая мала для насыщения образцов a—1, 2; б—2, поэтому петли, соответствующие этим образцам, являются частными циклами. По петлям, приведенным на рисунке, можно судить о степени влияния тепловой обработки осадков на их ферромагнитные свойства. Причем если отжиг при температуре 400°С ведет к интенсивному возрастанию как I_m , так и H_c , то при 200°С это возрастание больше для I_m (см. особенно г—2). При 600°С H_c изменяется больше, чем I_m . Отсюда следует предполагать, что в образцах при отжиге происходят изменения двух типов, один из которых ведет к изменению I_m , другой — к изменению H_c , причем при низких температурах первый процесс превалирует над вторым, а при высоких — второй над первым.

Появление петли с «осиной талией» (б—2, «перминварный» эффект) можно объяснить наличием двух фаз, обладающих различными ферромагнитными свойствами [6].

Влияние времени отжига на магнитные свойства образцов видно на рис. 2. Петли сняты при тех же условиях, что и на рис. 1, но с амплитудой поля 147 э. Четыре образца из пяти одинаковых (полученных при одинаковых условиях из ванны, соответ-

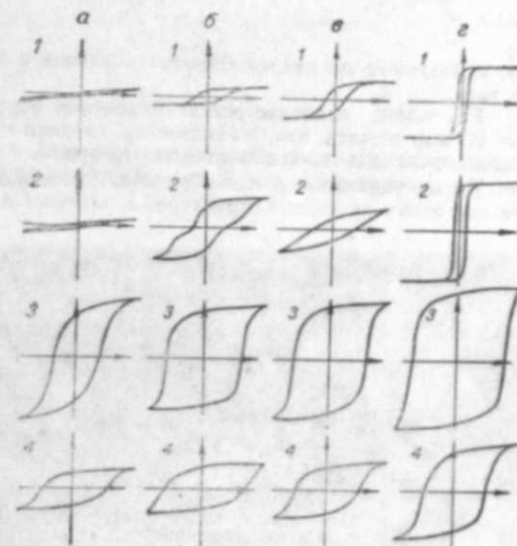


Рис. 1. Влияние температуры отжига на петли гистерезиса.

ствующей серии ε при температуре 80°C подвергались однократному отжигу при 400°C . Петля 1 соответствует неотожженному образцу: 2—5 — образцам, соответственно отожженным в течение 10, 20, 30 и 40 мин. В табл. 2 приведены H_c и I_m образ-

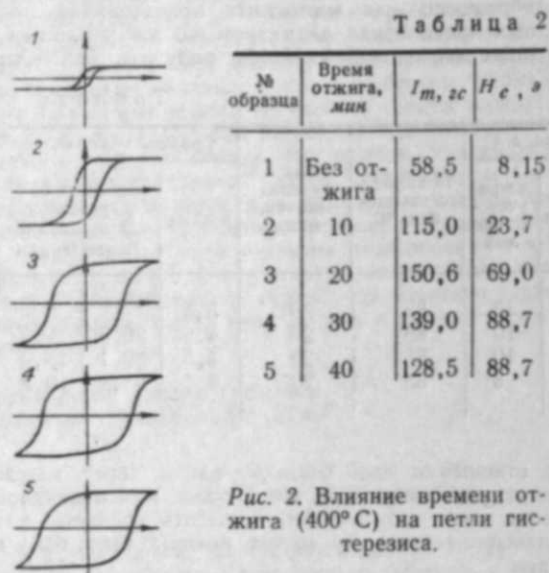


Рис. 2. Влияние времени отжига (400°C) на петли гистерезиса.

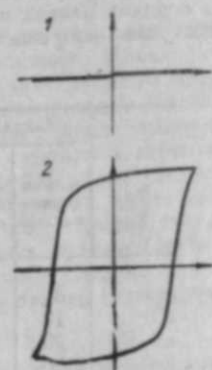


Рис. 3. Влияние отжига на магнитные свойства аморфного образца.

цов, измеренные по петлям. Номера образцов в таблице совпадают с номерами петель на рисунке.

Как видно, наиболее резкие изменения ферромагнитных свойств протекают в первые 20 мин отжига, что, по-видимому, связано с наибольшими структурными изменениями, происходящими в осадке за это время.

Кроме указанных выше образцов, были получены образцы, обладающие в исходном состоянии аморфной структурой и которые в соответствии с работой [3] не облада-

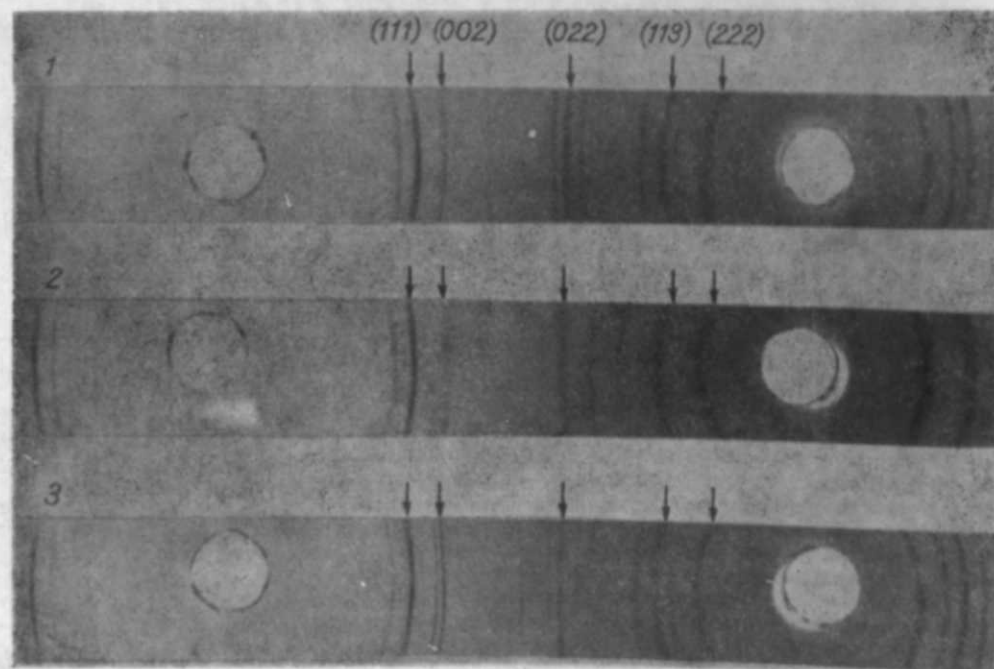


Рис. 4. Рентгенограммы неотожженных [1, 2] и отожженного [3] образцов.

ли ферромагнитными свойствами (рис. 3, кривая 1). Отжиг аморфных осадков ведет к появлению у них кристаллической структуры, что соответствует данным В. П. Моисеева [2], и к появлению ферромагнитных свойств (рис. 3, кривая 2)*.

Для выяснения связи структурных изменений с ферромагнитными, происходящими в осадках при их отжиге, проводились рентгеновские исследования. На рис. 4 приведены рентгенограммы образцов серии ε (табл. 1), снятые в неотфильтрованном Fe-излучении. Рентгенограмма 1, снятая с неотожженного образца, показывает дифракционную картину с размытыми линиями, соответствующую β -Ni. Кроме линий никеля, на рентгенограмме видны узкие линии медной подложки, которые при толщине осадка свыше 20 мк исчезают (рентгенограмма 2). Рентгенограмма 3, соответствующая образцу ε —3, показывает, что при отжиге осадки никеля приобретают более совершенную кристаллическую структуру, линии становятся более узкими, а интенсивность их увеличивается.

Характер изменения интенсивности и ширины линий (111) и (222) с ростом температуры отжига хорошо виден на рис. 5. Кривые сверху вниз соответствуют образцам ε —1, ε —3, ε —4 (рис. 1).

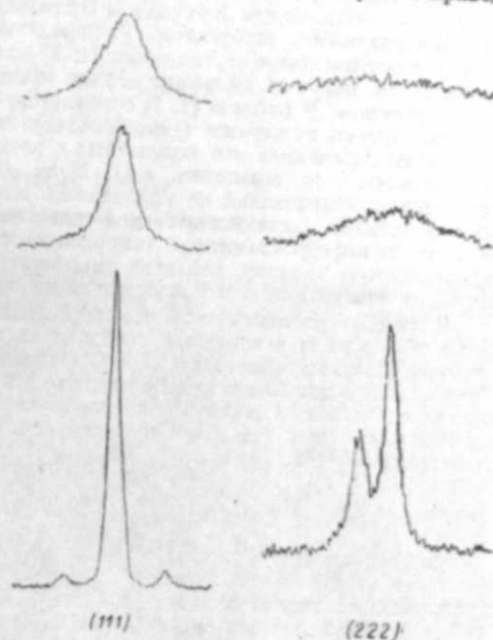


Рис. 5. Изменение ширины и интенсивности линий при отжиге.

Кроме увеличения интенсивности и резкости существующих линий, на рентгенограмме 3 (см. рис. 4) появляется около десяти новых линий, что, по-видимому, связано с выпадением при отжиге новых фаз.

Обсуждение результатов

Имея дело с осадками никеля, нужно иметь в виду, что они обладают сложной структурой, которая в одном и том же образце меняется от слоя к слою. Сложная структура осадков обусловлена наличием в них фосфора, который, помимо твердого раствора, образует в никеле ряд соединений интерметаллического типа. Рассматривая эти соединения как фазы (в том числе и твердый раствор фосфора в никеле), следует сказать, что в настоящее время нет достаточно полных данных как о количестве фаз, образующих осадок, так и о их составе и процентном содержании в осадках. Одновременное выделение нескольких фаз из макродиффузионного раствора можно объяснить микронеподнородностями раствора, возникающими вблизи поверхности покрытия в процессе образования осадка. Никелевые покрытия, получаемые химическим методом, должны представлять собою или мелкодисперсную смесь различных фаз, или основную фазу с мелкими включениями микрофаз. Следует отметить, что тепловая обработка может привести к образованию новых фаз, к количественному перераспределению существующих и к структурным изменениям, связанным, например, с переходом осадков из аморфного состояния в кристаллическое, с укрупнением блоков кристаллитов, с ростом самих кристаллитов и пр.

Все указанные здесь факты в той или иной степени влияют на магнитные свойства вещества, поэтому изменение хотя бы одного из них должно вести и к изменению магнитных свойств осадков. Магнитные свойства системы Ni—P не изучены, это относится как к твердому раствору фосфора в никеле, так и к интерметаллическим соединениям, в частности, неизвестно, являются ли последние ферромагнитными или нет.

Таким образом, магнитные исследования получаемых образцов дают средний результат сложной в магнитном отношении структуры осадков, которая к тому же меняется от слоя к слою и изменяется под действием внешних факторов, например температуры и др. То, что наряду с ферромагнитными включениями осадки могут иметь

* Рис. 3 приводится для иллюстрации влияния отжига на магнитные свойства осадков, обладающих в исходном состоянии аморфной структурой.

За последние годы им выдвинута идея «шахты будущего», где по-новому, оригинально решается задача добычи и транспортировки подземных ископаемых при безлюдном обслуживании механизмов и линий машин. Решение такой задачи имеет огромное значение для Сибири в связи с колоссальным размахом горной промышленности и переходом в ряде районов на разработку нижних горизонтов.

Под руководством Н. А. Чинакала и при его участии решается задача совершенствования шитовой системы и расширения области ее применения, улучшения и облегчения условий труда горнорабочих-шитовиков, значительного удешевления стоимости добываемого угля. Н. А. Чинакал содействовал разработке нового перспективного Томь-Усинского месторождения в Кузбассе, внедрению подземной гидравлической добычи угля, разработке и промышленному применению новых высокопроизводительных бурильных машин, разработке научных основ обогащения полезных ископаемых в Сибири, организации Сибирской комиссии по борьбе с силикозом и сети ее филиалов. Работы большого новатора горной науки Н. А. Чинакала направлены на дальнейшее развитие теории и практики горного дела.

Отдавая должное таланту и большим организаторским способностям Н. А. Чинакала, следует отметить главнейшие черты его многогранной творческой деятельности: неутомимое новаторство в науке, умение организовать комплексные научные исследования на решающих участках горной науки в Сибири, хорошую подготовку научных кадров. Юбилей Николая Андреевича Чинакала является знаменательным событием в жизни советской науки и техники.

П. Т. Приходько, В. Н. Леонтьев

ВАСИЛИЙ КУЗЬМИЧ ЩЕРБАКОВ

(К 60-летию со дня рождения и 35-летию научной и педагогической деятельности)

В августе 1963 г. исполнилось 60 лет со дня рождения одного из ведущих специалистов Сибири в области электроэнергетики доктора технических наук профессора В. К. Щербакова.

В 1928 г. Василий Кузьмич окончил Томский технологический (теперь политехнический) институт и с увлечением отдался научной работе. Здесь в институте он прошел путь от аспиранта до заведующего кафедрой, а затем начальника научно-исследовательского сектора и заместителя директора института.



Его по праву считают одним из основоположников электротехнического образования в Сибири. Он впервые в Сибири, в Томском политехническом институте, поставил преподавание цикла электротехнических дисциплин и выпуск инженеров по специальности «электрические станции, сети и системы».

Большой популярностью пользуется Василий Кузьмич как лектор и педагог, в 1941 г. ему было присвоено звание профессора.

Научная деятельность В. К. Щербакова охватывает широкий круг вопросов в области электрических сетей и систем, дальних линий электропередачи и техники высоких напряжений. Им выполнено свыше 70 научных работ.

Значительное место в исследованиях В. К. Щербакова занимают вопросы несимметричных режимов линий электропередачи. Итогом работы в этой области явилось опубликование монографии и защита в 1941 г. диссертации на степень доктора технических наук. Эти исследования послужили теоретической базой для внедрения комплекса мероприятий по повышению надежности работы ли-

ний электропередачи, питающих оборонные предприятия, что было чрезвычайно важно в условиях Великой Отечественной войны. В этот же период Василий Кузьмич ведет интенсивную научно-исследовательскую работу по созданию простых, дешевых и надежных схем электроснабжения оборонных заводов.

В 1954 г. проф. Щербаков был приглашен в молодой Новосибирский электротехнический институт, где он вновь организует ряд кафедр и лабораторий, обеспечивающих подготовку инженеров электроэнергетического профиля, остро необходимых сибирской энергетике. В настоящее время он заведует кафедрой электрических систем и сетей в этом институте.

Много внимания В. К. Щербаков уделяет подготовке научных кадров высшей квалификации. Под его руководством успешно защитили кандидатские диссертации 25 аспирантов.

С 1954 г. Василий Кузьмич Щербаков работает в Транспортно-энергетическом институте Западно-Сибирского филиала Академии наук СССР, а затем Сибирского отделения АН СССР в качестве заведующего лабораторией, а с 1960 г. — директора института.

Здесь под его руководством были разработаны перспективные структуры и балансы энергетических систем Западной Сибири и Красноярского края, послужившие основой для проектных разработок ведущими проектными организациями. Научная гипотеза развития ГЭС Сибири, предложенная в этих трудах, сейчас осуществляется практически.

Основным научным направлением работы Василия Кузьмича в последнее время является проблема передачи энергии на сверхдальние расстояния. Он исследовал особенности совместной работы мощной электропередачи постоянного тока и энергосистемы переменного тока. Особенно широко были поставлены работы по проблеме передачи электроэнергии переменным током напряжением 750—1000 кВ на расстояния 1500—3000 км.

Проведенные исследования свойств и особенностей электропередач, настроенных на полуволну, позволили впервые обосновать их перспективность.

В процессе разработки большой и сложной проблемы практического использования настроенных электропередач руководимый проф. В. К. Щербаковым коллектив успешно решает ряд принципиальных вопросов, связанных с выбором оптимальных схем настройки, режимом линии, устойчивостью, к.п.д., промежуточным отбором мощностей и т. д. Создана уникальная электродинамическая модель с линией, эквивалентной электропередаче длиной 6000 км. Результаты исследований обобщены в монографии.

Одновременно проф. Щербаков ведет большую организационную и общественную работу. Проходившие под его руководством многочисленные научно-технические совещания энергетиков Сибири, а также конференции по обсуждению проблемы настроенных электропередач способствовали решению актуальных вопросов энергетики. Он является членом Совета по координации научно-исследовательской работы высших учебных заведений Сибири и Дальнего Востока.

Василий Кузьмич неоднократно избирался членом городского комитета КПСС и городского Совета депутатов трудящихся г. Томска. Сейчас он проводит большую работу в научно-техническом обществе электротехнической промышленности. Проф. Щербаков является также ректором Новосибирского общественного университета новейших достижений науки и техники.

За свою плодотворную деятельность В. К. Щербаков награжден орденом Трудового Красного Знамени и медалями.

Скромность и внимательное отношение к людям при большой научной эрудиции создали Василию Кузьмичу авторитет и глубокое уважение к нему.

Отмечая 60 лет В. К. Щербакова, желаем ему дальнейших успехов в научной и педагогической деятельности.

СПИСОК
СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ
«ИЗВЕСТИЯ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР»
В 1963 г.

(серия технических наук)

- Решения ноябрьского Пленума ЦК КПСС — основа дальнейшего развития науки, № 2, вып. 1.
- Анисимов А. С. Оптимальное управление в следящих приводах с асинхронным двухфазным двигателем, № 10, вып. 3.
- Бабенко С. А. Флотация ильменита из песков, содержащих гуминовые вещества, № 10, вып. 3.
- Бандман О. Л. О физической осуществимости коэффициента передачи RC-схем, № 6, вып. 2.
- Бандман О. Л. Реализация функций коэффициента передачи RC-схем, № 10, вып. 3.
- Болштянский М. П. Напряжения и перемещения в оттаивающем грунтовом основании, подстилающем плиту, № 2, вып. 1.
- Бибик К. В. Новое аналитическое выражение производительности гидростройки, № 6, вып. 2.
- Борщевский Ю. Т. О взаимодействии вращающейся круговой решетки профилей и направляющих лопаток, обтекаемых вязкой жидкостью, № 6, вып. 2.
- Борщевский Ю. Т., Яковлев Н. А. О двухфазном пограничном слое, № 10, вып. 3.
- Васьков С. Т. Об одном способе измерения переменных напряжений по действующему значению, № 2, вып. 1.
- Владимиров В. М., Маттис А. Р. Определение оптимального расстояния между ковшами бескамерного ротора, № 2, вып. 1.
- Владимиров В. М., Маттис А. Р. Исследование процесса разгрузки ковшей бескамерных роторов, № 6, вып. 2.
- Войцеховский Б. В., Николаев В. П., Дудин В. М., Майер О. Ф., Черменский Г. П. Некоторые результаты разрушения горных пород импульсным водометом, № 2, вып. 1.
- Горбунов Ю. К., Каганов З. Г., Катковников Е. И. Определение волновых напряжений в обмотках электрических машин, № 6, вып. 2.
- Григолюк Э. И., Толкачев В. М. К теории многослойного термостата, № 10, вып. 3.
- Девятков Б. И. Применение специальной системы полиномов для приближения переходного процесса на бесконечном интервале, № 2, вып. 1.
- Девятков Б. И., Гимельштейн Ф. Я., Хорькова Г. С. Об использовании распределенного контроля для создания высококачественных систем управления технологическими процессами тепло- и массообмена, № 2, вып. 1.
- Дрокин А. И., Дылгеров В. Д., Судаков Н. И., Загирова Е. К. Температурная зависимость константы анизотропии и магнитная структура магний-марганцевых ферритов при комнатной температуре, № 2, вып. 1.
- Дружинин И. П., Коноваленко З. П., Хамьянова Н. В. Изучение связи стока соседних лет на реках азиатской части СССР с помощью электронной вычислительной машины, № 10, вып. 3.
- Земляков Б. А. К вопросу об уравнениях характеристик крупности, № 6, вып. 2.
- Ильенков А. И. Накопление неосновных носителей в полупроводниковых диодах при импульсах прямого тока с экспоненциальным фронтом, № 6, вып. 2.
- Калюжный А. X. Исследование самовозбуждения генератора, работающего на линию, настроенную на полуволну, № 10, вып. 3.
- Касперович А. Н. Анализ работы экстрематора на транзисторах, № 6, вып. 2.

- Козачок А. Г. Об одном способе разделения сигналов в многоканальных измерительных усилителях, № 2, вып. 1.
- Лозовская В. Ф., Пашков П. О. Кинетика разрушения металлических тонких листов, № 2, вып. 1.
- Меренков А. П., Хасилев В. Я. Расчет разветвленных тепловых сетей на основе их оптимизации с использованием электронных вычислительных машин (ЭВМ), № 10, вып. 3.
- Номикосов Ю. П., Свирщевский В. К. О повышении производительности бурения глубоких разведочных скважин, № 2, вып. 1.
- Пеев Хр. Д., Дюнин А. К. Искусственное регулирование снежного покрова в горных районах как средство управления стоком, № 2, вып. 1.
- Петреев А. М. О снижении отдачи ручных пневматических машин ударного действия путем совершенствования рабочего цикла, № 6, вып. 2.
- Попырин Л. С., Каплунов С. М. Оптимальные значения температур питательной воды и уходящих газов для крупных конденсационных электростанций в условиях Центральной Сибири, № 6, вып. 2.
- Соболев В. С. К теории метода накладной катушки при контроле вихревыми токами, № 2, вып. 1.
- Соколов С. Г. О влиянии метелей на электрическую прочность воздушного промежутка, № 2, вып. 1.
- Соколов С. Г. Новый принцип конструирования высоковольтных изоляторов, № 10, вып. 3.
- Сыров Ю. П. Методика расчета режимов работы ГЭС с применением цифровых электронных вычислительных машин в энергосистеме при комплексном использовании стока, № 6, вып. 2.
- Чеботаев В. П. Вопросы теории генератора с тормозящим полем, № 6, вып. 2.
- Чиненов П. П. Определение экономической величины мощности аварийного резерва на электростанциях, № 10, вып. 3.
- Шабанов С. И. Аналитическое исследование газификации и горения топлива в восходящем потоке пылевзвеси, № 6, вып. 2.
- Шарловская М. С., Шугуров В. Ф. О причинах образования золых отложений при сжигании черемховского угля, № 2, вып. 1.
- Шваб В. А., Смоловик В. А., Капустин А. М., Гайнутдинов Г. Г. Высоконапорное пневматическое транспортирование тонкодисперсных материалов, № 10, вып. 3.
- Щербаков В. К., Калюжный А. X. Методы оценки расчета электромагнитной устойчивости генератора, работающего на сложную внешнюю цепь с потерями, № 10, вып. 3.

Краткие сообщения

- Алаев Г. П. Определение кажущегося удельного веса порошкообразного кокса, № 6, вып. 2.
- Баховец Б. А., Лыщинский Г. П. Решение некоторых задач теории инвариантности методом дифференцирования, № 10, вып. 3.
- Болштянский М. П., Линцер А. В., Соколов Ю. В. Экспериментальное исследование напряжений в двухслойном грунтовом основании, № 10, вып. 3.
- Гаврилюк М. А. Чувствительность мостовых схем переменного тока, состоящих из двух- и четырехэлементных цепочек, № 6, вып. 2.
- Гюрджиян В. М., Пиотух Ю. Н. Влияние некоторых факторов на аэродинамику и теплообмен в трехкомпонентном потоке, № 2, вып. 1.
- Зимонт И. Л. Принципы получения материалов водного балласта для малых бассейнов, № 10, вып. 3.
- Зиновьев Г. С., Лопатин А. Г., Трубецкой А. И. Генератор наносекундных импульсов на полупроводниковых приборах, № 10, вып. 3.
- Иванченко А. М., Коробейникова В. Н. Схема для перемножения переменных напряжений, № 10, вып. 3.
- Капралов И. И. К вопросу о возбуждении дуги отрицательными импульсами напряжения, № 10, вып. 3.
- Козачок А. Г. Фазовое разделение сигналов в многоканальных измерительных усилителях, № 2, вып. 1.
- Коломников Ю. Д., Кривошеков Г. В., Тронцкий Ю. В., Чеботаев В. П. Некоторые характеристики газоразрядного оптического квантового генератора, № 2, вып. 1.
- Котельников Н. В., Коренев Н. А., Малинин П. А., Ермолина Т. Д. Влияние обжига на магнитные свойства и структуру никеля, получаемого химическим методом, № 10, вып. 3.
- Кривошеков Г. В., Калистратова И. Н. Некоторые характеристики плазмы, проявляющей за пределы разрядного пространства, № 6, вып. 2.

- Кулаков Н. Н. Статистические данные — основа для определения экономической эффективности и планирования надежности, № 6, вып. 2.
 Моргунов В. К. К методике изучения воздействия льда на гидротехнические сооружения, № 10, вып. 3.
 Рожков В. М., Гострем Р. В. Импульсный вольтметр повышенной точности, № 10, вып. 3.
 Сенин В. Г. Преобразование корреляционных функций процессов и полей системами с распределенными параметрами, № 10, вып. 3.
 Тропин Ю. Д., Якубайлик Э. К. Исследование магнитных свойств нитевидных монокристаллов железа, № 10, вып. 3.
 Хломенок П. Н. Быстродействующие системы автоматического регулирования со ступенчатой модификацией входного сигнала, № 10, вып. 3.
 Чеботаев В. П. Импульсная генерация на линии 11530 А в разряде неона, № 6, вып. 2.
 Шабанов С. И. Аппроксимация зависимости для коэффициента аэродинамического сопротивления сферической частички, № 6, вып. 2.

Критика и библиография

Шмаков В. М., Комлев А. М. Гидрография Западной Сибири, № 2, вып. 1.

Хроника

Кузнецов В. Е. Симпозиум по ферро- и антиферромагнетизму, № 2, вып. 1.
 Ольшевский О. В. Василий Кузьмич Щербаков, № 10, вып. 3.

Художественный редактор В. Г. Бурыкин
 Технический редактор А. М. Вялых
 Корректоры А. С. Симонова, Н. В. Пенькова

Подписано в печать 22 ноября 1963 г. МН 02937. Бумага 70×108/16 9,5 печ. л. = 13 усл. печ. л., 14 уч.-изд. л. Тираж 2000.

Издательство Сибирского отделения Академии наук СССР. Новосибирск, Советская, 20. Зак. № 320.
 Типография № 1 Полиграфмаша. Новосибирск, Красный проспект, 20. Цена 70 коп.

Отделение механики и процессов управления Академии наук СССР сообщает, что в 1964 году будет проведен конкурс на соискание премии имени С. А. Чаплыгина в размере 1000 рублей за лучшие оригинальные работы по теоретическим исследованиям в области механики.

Право выдвижения кандидатов на соискание премии имеют научные учреждения, высшие учебные заведения.

О П Е Ч А Т К И

Страницы	Строка	Напечатано	Должно быть
32	22 сверху	P_{ag}	P_{ax}
58	формула 3	$-\frac{M_c}{Jk} + \frac{k}{Jk} U_y \quad (3)$	$-\frac{M_c}{J} + \frac{k}{J} U_y \quad (3)$
75	формула 1 снизу в знаменателе знаменателя	$+\frac{1}{p^2 + 1,8d + 0,72}$	$+\frac{1}{p^2 + 1,8p + 0,72}$
79	формула (5)	$+\rho \frac{v_x^2}{\partial x}$	$+\rho \frac{v_x^2}{\partial x}$
125	формула 7	$= \frac{C}{1 + e^{-\frac{a}{2} \cdot \frac{\tau}{\sin \psi}}} \quad (7)$	$= \frac{C}{1 + e^{-a/2} \cdot \tau / \sin \psi}$

Известия Сибирского отделения АН СССР,
 № 10, вып. 3, серия технических наук.

- Кулаков Н. Н. Статистические данные — основа для определения экономической эффективности и планирования надежности, № 6, вып. 2.
 Моргунов В. К. К методике изучения воздействия льда на гидротехнические сооружения, № 10, вып. 3.
 Рожков В. М., Гострем Р. В. Импульсный вольтметр повышенной точности, № 10, вып. 3.
 Сенин В. Г. Преобразование корреляционных функций процессов и полей системами с распределенными параметрами, № 10, вып. 3.
 Тропин Ю. Д., Якубайлик Э. К. Исследование магнитных свойств нитевидных монокристаллов железа, № 10, вып. 3.
 Хоменок П. Н. Быстродействующие системы автоматического регулирования со ступенчатой модификацией входного сигнала, № 10, вып. 3.
 Чеботаев В. П. Импульсная генерация на линии 11530 А в разряде неона, № 6, вып. 2.
 Шабанов С. И. Аппроксимация зависимости для коэффициента аэродинамического сопротивления сферической частички, № 6, вып. 2.

Отделение механики и процессов управления Академии наук СССР сообщает, что в 1964 году будет проведен конкурс на соискание премии имени С. А. Чаплыгина в размере 1000 рублей за лучшие оригинальные работы по теоретическим исследованиям в области механики.

Право выдвижения кандидатов на соискание премии имеют научные учреждения, высшие учебные заведения, конструкторские бюро, научные общества, ведомства, действительные члены и члены-корреспонденты Академии наук СССР и академий наук союзных республик.

На соискание именной премии представляются опубликованные научные работы (серия работ) или материалы научного открытия (изобретения) в 3 экземплярах;

мотивированное представление, включающее научную характеристику работы, ее значение для развития науки и народного хозяйства, а также сведения об авторе с перечнем его основных научных работ и изобретений; справку о том, что представляемая работа ранее не премировалась.

Материалы с надписью «На соискание премии им. С. А. Чаплыгина» направлять в Отделение механики и процессов управления АН СССР по адресу: Москва В-71, Ленинский пр., 14.

Срок представления работ — до 15 января 1964 г.

Художественный редактор В. Г. Бурыкин
 Технический редактор А. М. Вялых
 Корректоры А. С. Симонова, Н. В. Пенькова

Подписано в печать 22 ноября 1963 г. МН 02937. Бумага 70×108/16 9,5 печ. л. — 13 усл. печ. л., 14 уч.-изд. л. Тираж 2000.

Издательство Сибирского отделения Академии наук СССР. Новосибирск, Советская, 20. Зак. № 320. Типография № 1 Полиграфиздата. Новосибирск, Красный проспект, 20. Цена 70 коп.

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научный журнал

ИЗВЕСТИЯ**СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
АКАДЕМИИ НАУК СССР**

В 1963 г. журнал выходит четырьмя сериями (общественные науки, техническая, химическая, биолого-медицинская), в течение года в каждой серии выйдет три номера объемом по 10 печ. л. Подписка принимается как по сериям, так и на журнал в целом.

В серии общественных наук будут публиковаться статьи по вопросам экономики комплексного развития и размещения народного хозяйства Сибири и Дальнего Востока, рационального использования трудовых ресурсов, региональных особенностей организации труда и применения техники, экономики освоения новых предприятий и т. д., по вопросам истории, археологии и этнографии Сибири и Дальнего Востока; по вопросам филологии, в частности по проблемам языков народов Сибири.

В технической серии будут освещаться итоги научно-теоретических и экспериментальных исследований в области прикладной и теоретической механики, горного дела, энергетики и электротехники, металлургии, гидравлики, радиоэлектроники, автоматизации и электрометрии и др.

Серия химическая предназначается для публикации работ, выполненных в химических институтах СО АН СССР, по неорганической, органической и физической химии, за исключением областей, обеспечиваемых специальными журналами СО АН СССР «Структурная химия», «Кинетика и катализ».

Серия биолого-медицинская будет освещать результаты новейших исследований по ботанике, лесоведению, зоологии, почвоведению, цитологии и генетике, по вопросам экспериментальной медицины (имеющим общеприкладное значение).

В журнале будут печататься также статьи методического и обзорного характера, критико-библиографические материалы.

Читатель найдет в журнале разностороннюю информацию о жизни научных учреждений Сибири и Дальнего Востока.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА ЖУРНАЛА

Серия общественных наук (3 номера в год)—2 р. 10 к.

Серия техническая " " "

Серия химическая " " "

Серия биолого-медицинская " " "

Цена полного комплекта журнала (12 номеров в год)—8 р. 40 к.

Цена отдельного номера 70 коп.

Подписка принимается всеми отделениями Союзпечати и агентствами связи, а также магазинами «Академкнига».

Отдельные номера журнала могут быть высланы наложенным платежом. Заказы направлять в редакцию журнала (Новосибирск, Советская, 20, комн. 401).