

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Издается с 1947 г.

Журнал выходит на русском языке 6 раз в год

Կ Մ Ր Ա Դ Ր Ա Կ Ա Ն Ի Ո Ւ Ե Դ Ի Ա

Կոստյան Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Աղանյ 2. Յ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Ալեխանյան Վ. Վ., Անտոնյան Ա. Կ., Զաքարյան Մ. Ա., Հակոբյան Ի. Ն.,
Ստեփանյան Յու. Լ., Ստանկյան Մ. Ի., Տեր-Ազարե Ի. Ա.,
Փենտյան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Պատասխանատու րարտագրար Ստեփանյան Զ. Պ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Касьян М. В. (ответ. редактор), Адони Г. Г. (зам. ответ. редактор),
Алексеевский В. В., Ананян А. К., Акопян Р. Е., Задоян М. А.,
Пинаджян В. В. (зам. ответ. редактор), Саркисян Ю. Л.,
Стакян М. Г., Тер-Азарьев Н. А.
Ответственный секретарь Стелания З. К.

Խմբագրության հասցեն՝ Երևան-19, Բաբեկամոբյան փող. 24 գ.
Адрес редакции: Ереван-19, ул. Барекамутян 24 г.

ЭНЕРГЕТИКА

Л. А. УНИАНЯН

ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ
ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

Опишем газотранспортную сеть в динамике развития графами $G_r(X^r, T^r)$, соответствующими дискретным временным уровням r ($r = \overline{1, N}$) периода планирования. В соответствии с принятой практикой планирования предполагается последовательное расширение сети:

$$G_1(X^1, T^1) \subseteq G_2(X^2, T^2) \subseteq \dots \subseteq G_N(X^N, T^N).$$

Дугам графов ставятся в соответствие действующие или проектируемые газопроводные участки и компрессорные станции, а вершинам — источники, потребители и нейтральные узлы. Пусть для каждого элемента (i, j) системы заранее отобраны n_{ij} возможных вариантов усиления (по действующим элементам) или создания (по проектируемым элементам). Для простоты предположим, что набор технических решений по всем временным уровням r ($r = \overline{1, N}$) один и тот же. Обозначим средние затраты реализации k -го варианта технических решений по газопроводным участкам через $\bar{C}_{ijk}^{1/r}$, а по компрессорным станциям — $\bar{C}_{ijk}^{2/r}$.

Известны функции распределения случайных среднесуточных спросов Q_{im}^1 в газе потребителей — $F_{im}^1(Q_{im}^1)$ и отборов газа Q_{im}^2 из источников системы с давлениями $P_{im}^2 = F_{im}^2(Q_{im}^2)$. Предположим некоррелированность между рассматриваемыми случайными факторами. Вышестоящей организацией заданы вероятности обеспечения спроса потребителей α_{im}^1 и неперевышения отборов газа из источников α_{im}^2 .

Требуется определить оптимальную стратегию развития сети на планируемый период (оптимальные технические решения по дискретным временным уровням) и оптимальные режимы ее работы, при которой суммарные приведенные затраты на систему минимальны.

При этих условиях математическая модель задачи оптимизации выглядит следующим образом (для упрощения модели в целевую функцию не включены эксплуатационные затраты действующей части системы).

Найти минимум

$$S = \min_{\{X'_{ijk}, Y'_{ijk}\}} \left\{ \sum_{(i,j) \in T_{ry}^N} \sum_{r=1}^N \sum_{k=1}^{n_{ij}} \bar{C}_{ijr}^{ry} \cdot X'_{ijk} + \sum_{(i,j) \in T_{kc}^N} \sum_{r=1}^N \sum_{k=1}^{n_{ij}} \bar{C}_{ijr}^{kc} \cdot Y'_{ijk} \right\} \quad (1)$$

при выполнении следующих условий:

$$P \left\{ \sum_{j \in X'_{ry}} \operatorname{sgn} (P_j' - P_l') \cdot Q'_{jl} + \sum_{j \in X'_{lkc}} \operatorname{sgn} (P_l' - P_j') \cdot Q'_{jl} \geq Q'_{in} \right\} > \tau'_{in}, \text{ если } i \in I'_{in}; \quad (2)$$

$$\sum_{i \in X'_{ry}} \operatorname{sgn} (P_i' - P_j') \cdot Q'_{ji} + \sum_{j \in X'_{lkc}} \operatorname{sgn} (P_i' - P_j') \cdot Q'_{ji} = 0, \text{ если } i \in I'_{in}; \quad (3)$$

$$P \left\{ \sum_{i \in X'_{ry}} \operatorname{sgn} (P_j' - P_{lu}') \cdot Q'_{ji} + \sum_{j \in X'_{lkc}} \operatorname{sgn} (P_{lu}' - P_j') \cdot Q'_{ji} \leq Q'_{lu} \right\} > \tau'_{lu}, \text{ если } i \in I'_{lu}; \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{n_{ij}} X'_{ijk} = 1, \text{ если } (i, j) \in T_{ry}' \subset T_{ry}'; \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{n_{ij}} X'_{ijk} \leq 1, \text{ если } (i, j) \in T_{ry}' \subset T_{ry}'; \quad (6)$$

$$T_{ry}' \cup T_{ry}' = T_{ry}', \quad T_{ry}' \cap T_{ry}' = \emptyset, \quad X'_{ijk} = \{0, 1\}; \quad (7)$$

$$Q'_{ij} \cdot \prod_{m=1}^r \left(1 - \sum_{k=1}^{n_{ij}} X'_{ijk} \right) = 0, \text{ если } (i, j) \in T_{ry}' \cap I_{uv}''; \quad (8)$$

$$P_i^2 - P_i^1 = e \cdot L_{ij} \cdot Q'_{ij} \left(d_{ij}^1 + \sum_{m=1}^r d_{ijk}^m \cdot X'_{ijk} \right)^{5.2}, \quad (i, j) \in T_{ry}'; \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{n_{ij}} Y'_{ijk} = 1, \text{ если } (i, j) \in T_{kc}' \subset T_{kc}'; \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{n_{ij}} Y'_{ijk} \leq 1, \text{ если } (i, j) \in T_{kc}' \subset T_{kc}'; \quad (11)$$

$$T_{kc}' \cup T_{kc}' = T_{kc}', \quad T_{kc}' \cap T_{kc}' = \emptyset, \quad Y'_{ijk} = \{0, 1\}; \quad (12)$$

$$(P_i' - P_j') \cdot \prod_{m=1}^r \left(1 - \sum_{k=1}^{n_{ij}} Y'_{ijk} \right) = 0, \text{ если } (i, j) \in T_{kc}' \cap T_{kc}''; \quad (13)$$

$$a_{ij} \cdot \sqrt{\frac{a_{ij}^1 \cdot \max (P_i^1, P_j^1) - \min (P_i^1, P_j^1)}{b_{ij}}} + \sum_{m=1}^r Y'_{ijk} \cdot \sqrt{\frac{a_{ijk} \cdot \max (P_i^2, P_j^2) - \min (P_i^2, P_j^2)}{b_{ijk}}} = Q'_{ij}; \quad (14)$$

$$0 < \underline{P}_{i(j)} \leq \bar{P}'_{i(j)} \leq \bar{P}_{i(j)}, \text{ если } i(j) \in X'; \quad (15)$$

$$0 < \underline{Q}_{ij} \leq \bar{Q}_{ij}, \text{ если } (j, i) \in T'; \quad (16)$$

$$\underline{Q}'_{in} \leq \bar{Q}'_{in} \leq \bar{Q}_{in}, \text{ если } i \in I'_n; \quad (17)$$

$$\underline{Q}_{in} \leq \bar{Q}'_{in} < \bar{Q}_{in}, \text{ если } i \in I_n; \quad (18)$$

$$r = \overline{1, N}.$$

В модели использованы следующие обозначения:

α_i — коэффициент приведения расчетных затрат к началу расчетного периода [1]; $\underline{Q}'_{in}$, $\bar{Q}'_{in}$ — планируемый поток газа i -му потребителю и отбор газа из i -го источника; X'_{ij} и X'_{in} — соответственно, множества газопроводных участков и компрессорных станций, смежных к i -му узлу; $\underline{Q}_{ij}$ — поток газа от j -го узла к i -му узлу; $\bar{P}_i$, $\bar{P}'_i$ — давления газа в i -м и j -м узлах; L_{ij} — длина газопроводного участка (i, j) ; d_{ij}^1 и d_{ij}^k — эквивалентные диаметры труб, действующих на участке (i, j) и для k -го варианта технических решений; ε — газодинамический коэффициент; a_{ij}^1 , b_{ij}^1 и a_{ij}^k , b_{ij}^k — параметры действующей станции, определяемые по методике [2] и те же для k -го варианта технических решений; $\underline{P}_{i(j)}$, $\underline{Q}_{in}$, $\underline{Q}'_{in}$ и $\bar{P}'_{i(j)}$, $\bar{Q}'_{ij}$, $\bar{Q}_{in}$, $\bar{Q}'_{in}$ — нижние и верхние пределы соответствующих переменных; I_n , I'_n , I_n — соответственно, множества потребителей, нейтральных узлов и источников; $T_{гг}$, $T_{кс}$ и $T_{гг}^{нов}$, $T_{кс}^{нов}$ — множества имеющихся и новых газопроводных участков и компрессорных станций; $T_{гг}$, $T_{кс}$ и $T_{гг}^*$, $T_{кс}^*$ — подмножества элементов системы, по которым, соответственно, обязательно и необязательно проведение новых технических решений.

Для действующих компрессорных станций h_{ij} принимается равным 1, для новых — 0. Пределы $\underline{Q}'_{in}$, $\bar{Q}'_{in}$ и $\bar{Q}_{in}$, $\bar{Q}'_{in}$ определяются, исходя из соответствующих функций распределений. Индекс r указывает на принадлежность данной величины r -му временному уровню.

Сформулированная выше модель является дискретно-непрерывной задачей стохастического математического программирования, которая может быть сведена к детерминированному эквиваленту, если перейти от вероятностных условий (2), (4) к детерминированным [3]. Однако точное решение данной задачи в общем случае затруднительно из-за его комбинаторного характера и отсутствия эффективных алгоритмов. Поэтому на практике можно ограничиться приближенным решением [4].

Другой подход к реализации модели заключается в использовании эквивалентных условий по дискретным переменным X'_{ij} и Y'_{in} (например, $X'_{ij} - X'_{in} = 0$, $Y'_{in} - Y'_{in} = 0$), что позволяет перейти к полностью непрерывной задаче математического программирования,

для решения которой имеется широкий арсенал методов градиентного и поискового типа.

Данная модель применима в первую очередь к районным газотранспортным системам, что обусловлено возникающими трудностями вычислительного характера при рассмотрении больших газоснабжающих систем. Однако при условии агрегирования элементов системы, объединения потребителей (что и практикуется при рассмотрении больших систем газоснабжения), а также при условии рассмотрения ограниченного количества вариантов развития элементов системы, модель может быть применена и к Единой газотранспортной системе или крупным ее подсистемам.

Ер. компл. отд.
ВНИИЭГазпром

Поступило 1.XII.1979.

Ն. Ն. ՆՈՒՆՅԱՆ

ԴԱԶԱՏՐԱՆՍՊՐՏԱՅԻՆ ՑԱՆՑԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼԻԶԱՄ

ԴԻՍԿՐԵՏ-ԱՆԸՆԴՀԱՆ ԿՈՒԳԵԼ

Ա. Մ. Փ. Ո. Փ. Ն. Ս. Մ.

Առաջարկվում է դադատար ցանցերի դինամիկ պարզացման օպտիմալացման մաթեմատիկական մոդել: Այն պարունակում է դիսկրետ և անընդհատ փոփոխականներ, որոնք որոշում են համակարգի սխեման և նրա աշխատանքի ուժերը: Ելակետային ինֆորմացիան ենթադրվում է հավանականորեն որոշված: Մոդելը իրագործվում է մաթեմատիկական ծրագրավորման մեթոդներով, որոնք հաշվի են առնում դիսկրետ և անընդհատ փոփոխականների առկայությունը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А. А., Медведев А. А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. М., «Наука», 1973.
2. Александров А. В., Яковлев Е. Н. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта газа. М., «Недра», 1974.
3. Юдин Л. Б. Математические методы управления в условиях неполной информации. М., «Советское радио», 1974.
4. Финкельштейн Ю. Ю. Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования. М., «Наука», 1976.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Л. О. КАРАХМЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО
ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЦ

В технике связи и радиотехнике, а также в электромашиностроении широко применяются магнитодиэлектрики (МД), представляющие собой смесь ферромагнитных частиц и связующего диэлектрика. Расширение области применения этих материалов сопровождается непрерывным ростом требований к получению определенных сочетаний электромагнитных и механических свойств.

Для выбора оптимальных значений параметров МД необходимо иметь зависимость этих параметров от свойств ферромагнитной и диэлектрической фаз. В настоящее время расчет средних параметров МД осуществляется на основе модельных теорий, в которых приняты упрощающие ограничения. Однако экспериментальные данные средних параметров часто дают существенное расхождение с теоретическими, что объясняется несоответствием основных теоретических предположек, на основе которых получены расчетные формулы, и действительных условий. При определении средних параметров МД часто не учитывается то обстоятельство, что феррочастица в МД намагничивается в сложном, неоднородном поле, зависящем от взаимного расположения ближайших частиц. При этом собственное поле феррочастицы должно быть учтено совокупностью диполей и мультиполей высокого порядка.

В статье рассматривается задача расчета средней магнитной проницаемости неоднородной среды, моделирующей МД, со сферическими феррочастицами, расположенными в узлах прямоугольной пространственной решетки при учете взаимного влияния феррочастиц мультиполями до 3-го порядка включительно.

Рассмотрим неоднородную среду со сферическими ферромагнитными включениями одинакового радиуса a , помещенную в однородное постоянное магнитное поле H . Связь между индукцией в ферромагнитных включениях и напряженностью определяется линейной функцией

$$B = \mu_0 \mu_0' H, \quad (1)$$

где μ_0 — начальная магнитная проницаемость вещества включений. Магнитная проницаемость среды, окружающей включения, равна μ_0 .

Для того, чтобы определить среднюю проницаемость рассматриваемой неоднородной среды, необходимо рассчитать коэффициент B , [1],

пропорциональный среднему дипольному моменту сферических включений. Начало декартовой системы координат совместим с центром некоторой сферы P , причем ось z направим параллельно H . Обозначим через Q некоторый шар, отличный от P .

В рассматриваемой области нет токов. Следовательно,

$$\operatorname{rot} \vec{H} = 0 \quad (2)$$

и

$$\vec{H} = -\operatorname{grad} U, \quad (3)$$

где U — скалярный магнитный потенциал.

Из условия отсутствия источников поля вектора магнитной индукции следует:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0. \quad (4)$$

Подставив $B = -\mu_0 \operatorname{grad} U$ в (4), можно прийти к уравнению Лапласа $\nabla^2 U = 0$, решение которого для внешней и внутренней (по отношению к сферическому включению P) областей определяется выражениями [1]:

$$U_e = \sum_{n,m} (A_n^m r^n + B_n^m r^{-n-1}) P_n^m(\cos \varphi) \cos m\psi; \quad (5)$$

$$U_i = \sum_{m,n} C_n^m r^n P_n^m(\cos \varphi) \cos m\psi; \quad (6)$$

$$n = 1, 3, 5, \dots, m = 0, 2, 4, \dots, m < n,$$

где $P_n^m(\cos \varphi)$ — присоединенная функция Лежандра первого рода.

Из граничных условий на поверхности сферического включения можно получить связь между коэффициентами A_n^m , B_n^m и C_n^m :

$$A_n^m = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} a^{-(2n+1)} B_n^m; \quad C_n^m = \frac{2n+1}{n + \nu n + 1} A_n^m; \quad \nu = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (7)$$

Для определения коэффициентов A_n^m , B_n^m , C_n^m авторы [1, 2] представляют потенциал U_e точки с координатами x, y, z , как результат наложения потенциала внешнего однородного поля ($-Hz$) и суммы потенциалов всех мультиполей Q и P относительно точки (x, y, z) :

$$Hz = \sum_{m,n} A_n^m r^n P_n^m(\cos \varphi) \cos m\psi = \sum_{n,m} B_n^m \sum_{Q,P} r^{n-1} P_n^m(\cos \varphi) \cos m\psi, \quad (8)$$

где r, φ, ψ — сферические координаты точки (x, y, z) относительно центров сфер Q_s .

Применяя к выражению (8) оператор

$$L_N^M = \frac{\partial^N}{\partial z^{N-M} \partial x^M} \quad (9)$$

и переходя к пределу при $(x, y, z) \rightarrow 0$, получим систему алгебраических уравнений для нахождения коэффициентов A_n^m и B_n^m :

$$\begin{aligned} -H_N - M!(N-M)! \sum_n A_n^m a_n(N, m) = \\ = \sum_n \sum_m \frac{(n+N-M-m)!}{(n-m)!} B_n^m \sum_{n+N-M-m} \end{aligned} \quad (10)$$

где $H_N = 0$ при $N \neq 1$; $H_1 = H$; $h = \frac{1}{2}(M-m)$; $N, n = 1, 3, 5, \dots$; $m, M = 0, 2, 4, 6, \dots$

$$a_n = \frac{(n-m)(n-m-1) \cdots (n-m-2h+1)(-1)^n}{4^h h! (m+1)(m+2) \cdots (m+h)} a_0 \quad (11)$$

$$a_0 = \frac{(n+m)!}{2^n \cdot m! (n-m)!} \quad (12)$$

Вспомогательные коэффициенты $\sum_{n,m}^M$ в (10) определяются только геометрическими характеристиками пространственной решетки, в узлах которой расположены сферические включения.

Рассмотрим случай кубической пространственной решетки ($\alpha = \beta = \gamma$). В этом случае вспомогательные коэффициенты определяются следующим выражением:

$$\sum_{n,m}^M = \pi^{-(n+m-1)} S_{n,m}^M \quad (13)$$

$$M, m = 0, 4, 8, 12, \dots \quad (14)$$

Значения $S_{n,m}^M$ различных порядков определены в [1] и [2]:

$$S_1 = 2,092; S_2 = 3,1059; S_3 = 0,5733; S_4 = 3,2592.$$

В большинстве случаев при $n = 3$ (учет мультиполей до третьего порядка включительно) уже достигается удовлетворительная точность средней проницаемости. Поэтому ограничимся решением системы, обрывающемся на $n = 3$. При этом получается система линейных уравнений:

$$\begin{cases} A_1 + 2B_1 \Sigma_2 + 4B_3 \Sigma_4 = H; \\ A_2 + 4B_2 \Sigma_4 + 20B_4 \Sigma_6 = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Для определения B_1 из этой системы выразим A_1 и A_2 через B_1 и B_2 по (7):

$$A_1 = \frac{\mu_1 + 2\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} a^{-3} B_1; \quad A_3 = \frac{4(3\mu_2 + \mu_1)}{\mu_2 - \mu_1} a^{-7} B_3. \quad (16)$$

Подставляя значения A_1 , A_3 и Σ_2 , Σ_1 , Σ_0 по (14) и (15), получим:

$$\begin{cases} B_1 \left(4,18 a^{-3} + \frac{2\mu_2 + \mu_1}{\mu_2 - \mu_1} a^{-7} \right) + 12,44 a^{-1} B_3 = -H; \\ B_1 \cdot 12,44 a^{-5} + B_3 \frac{4\mu_2 + 3\mu_1}{3(\mu_2 - \mu_1)} a^{-7} + 11,52 a^{-7} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Решение полученной системы относительно B_1 дает:

$$B_1 = \frac{\left| \frac{4\mu_2 + 3\mu_1}{3(\mu_2 - \mu_1)} a^{-7} + 11,52 a^{-7} \right| (-H)}{\left| \frac{(4\mu_2 - 3\mu_1)}{3(\mu_2 - \mu_1)} a^{-1} + 11,52 a^{-1} \right| \left(4,18 a^{-3} + \frac{2\mu_2 + \mu_1}{\mu_2 - \mu_1} a^{-7} \right) - (12,44)^2 a^{-10}}. \quad (18)$$

Для определения средней (эффективной) магнитной проницаемости выразим расстояние между ближайшими сферами решетки через радиус и объемную концентрацию сферических включений. Используя выражение объемной концентрации включений, можно получить следующую связь:

$$\alpha = a \left(\frac{4\pi}{3\rho} \right)^{1/3}. \quad (19)$$

Подстановка (18) и (19) в формулу $\mu_{\text{ср}} = \mu_2 \left(1 - \frac{4\pi\beta_1}{3\beta_1 H} \right)$ дает

$$\mu_{\text{ср}} = \mu_2 \left[1 - \frac{3\rho(\mu_1 - \mu_2)}{\mu_1(1-\rho) + \mu_2(\rho+2) - \frac{3(\mu_2 - \mu_1)^2 \cdot 154,75 (a/\alpha)^6}{4\mu_2 + 3\mu_1 + 34,56(\mu_2 - \mu_1)(a/\alpha)^2}} \right]. \quad (20)$$

Сопоставлением зависимости (20) с формулой Релея можно убедиться, что в (20) имеется дополнительный член $\delta = 34,56(\mu_2 - \mu_1)(a/\alpha)^2$. Если при определении B_1 учесть только первые вспомогательные коэффициенты Σ_2 и Σ_1 , то $\delta = 0$ и (20) переходит в формулу Релея.

Оценим влияние дополнительного члена δ на величину средней магнитной проницаемости при $\mu_1 \rightarrow \infty$ и $\mu_2 = 1$. Разделив числитель и знаменатель выражения (20) на μ_1 и переходя к пределу, вместо (20) получим:

$$\mu_{\text{ср}} = 1 + \frac{3\rho}{1 - \rho - \frac{3 \cdot 154,75 (a/\alpha)^6}{3 - 34,56 (a/\alpha)^2}}. \quad (21)$$

При максимально возможной объемной концентрации сферических ферромагнитных включений $\rho_{\text{max}} = \frac{\pi}{6}$ по (21) получаем $\mu_{\text{ср}} = 6,05$.

По формулам Релея и Лоренц-Лорентца максимальная проницаемость будет 5,82 и 4,28, соответственно. Следовательно, уточнение формулы Релея [1, 2] с помощью дополнительного члена $\delta = 34,56 (\mu_2 - \mu_1) (\alpha/\lambda)^2$ дает предельное увеличение $\mu_{\text{ср}}$ на 41,3% по сравнению с расчетом по формуле Лоренц-Лорентца.

В таблице приведены расчетные значения средней магнитной проницаемости при разных значениях объемной концентрации ρ для случая, когда сферы расположены в узлах кубической решетки и $\frac{\mu_1}{\mu_2} \rightarrow \infty$.

Таблица

ρ	Средняя проницаемость по:		
	Лоренц-Лорентцу	Релею	формуле (20)
0.1	1,33	1,33	1,33
0.2	1,75	1,75	1,75
0.3	2,29	2,3	2,32
0.4	3	3,18	3,21
0.5	4	5,4	5,6
0.52	4,28	5,82	6,05

Как видно из таблицы, при $\rho \leq 0,4$ расчетные значения $\mu_{\text{ср}}$, полученные по формуле Лоренц-Лорентца, мало отличаются от значений, полученных по (21). При больших значениях объемной концентрации ($\rho \geq 0,4$) учет мультиполей 3-го порядка (октуполей) дает существенное увеличение $\mu_{\text{ср}}$.

Формулу статической проницаемости (20) можно распространить на случай синусоидального внешнего поля. Подставляя в (20) вместо μ вещества феррочастиц эквивалентную комплексную проницаемость сферической феррочастицы [3], получим выражение средней комплексной проницаемости рассматриваемой неоднородной среды.

Выводы

1. Получено выражение статической магнитной проницаемости неоднородной среды на основе полного учета дипольного и октупольного взаимодействия намагниченных феррочастиц.

2. Показано, что при высоких концентрациях строгий учет взаимного влияния намагниченных феррочастиц с помощью мультиполей высоких порядков может существенно приблизить расчетные значения $\mu_{\text{ср}}$ к экспериментальным.

1. 2. ԿԱՐԱՆԱՆՅԱՆ

ԱՆՀԱՄԱՍՆՈՒ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ՄԱԳՆԵՍԻՍԱԿԱՆ ԹԱՓԱՆՑՆԵՐԻՌԵՅԱՆ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ՝ ՀԱՇՎԻ ԱՌՆԵԼՈՎ ՄԱՍՆԱԿՆԵՐԻ ՓՈԽԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Հողփածում ուսումնասիրվում է գնդաձև ֆերրոմասնիկներով մագնիսադիէլեկտրիկի համարմեք թափանցելիության կախումը մասնիկների ծավալային կոնցենտրացիայից և գնդիկների մագնիսական թափանցելիությունից: Իրտածվում է անալիտիկ արտահայտություն, որն ստացվում է Լապլասի «ափսոսարման լուծման հիման վրա, հաշվի առնելով ֆերրոմասնիկների փոխադարձ ադհեզությունը միմյանց վրա բարձր կարգի մուլտիպոլների միջոցով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Rayleigh J. W. On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium. "Phil. Magazine", 1892, v. 34.
2. Толмачев С. Т. Расчет потенциала в прямоугольной пространственной системе сферических элементов, помещенных во внешнее однородное поле. «Электротехника», 1974, № 10.
3. Поляков К. М. Ферромагнетики. М., Госэнергоиздат, 1957.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. Л. МИНАСЯН

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ПОДСХЕМАХ «ТИРИСТОР-ЗАЩИТНАЯ ЦЕПЬ»

Одной из актуальных проблем преобразовательной техники является разработка преобразователей электрической энергии повышенной и высокой частоты с оптимальными весо-габаритными и стоимостными характеристиками, что в конечном итоге сводится к задаче снижения потерь в преобразователях и улучшению их динамических свойств.

В настоящее время основной трудностью, возникающей в ходе решения указанной задачи, является отсутствие достаточно точного и по возможности простого машинного представления переходных процессов, имеющих место в нелинейных элементах схемы преобразователя, таких, в частности, как тиристор и насыщающийся реактор (НР).

Возможности большинства из разработанных программ анализа и расчета вентиляльных преобразователей не допускали учета указанных переходных процессов и машинный анализ производился со следующими приближениями:

1. Элементы силовой схемы преобразователя линейны.
2. Вентили являются идеальными ключами.
3. Коммутация вентилей мгновенна.

Такая идеализация элементов схемы преобразователя может быть приемлемой лишь в области низких частот ($f < 400$ Гц) и лишь в некоторых частных случаях.

Целью настоящей работы является описание цифровых моделей подсхем «Тиристор-защитная цепь» (Т-ЗЦ), разработанных согласно методике ELTRAN [1] с применением математических моделей насыщающегося реактора и тиристора на этапе выключения.

Отличительной чертой указанных моделей является то, что применяемые в них математические модели нелинейных элементов получены на основе рассмотрения физических процессов, имеющих место в этих элементах в переходных режимах.

Так, например, математическая модель тиристора получена решением уравнения непрерывности, описывающего поведение неосновных носителей широкой n -базы прибора (дырок), с граничными условиями, соответствующими различным этапам моделируемого переходного процесса [2, 3], математическое описание которого задается системой [3]:

$$\begin{cases} P_0 = EP_1 - GP_2 + I_0 j(t); \\ P_1 = BP_1 + CP_{n-1} + CP_{n-2}; \\ P_{n-1} = FP_{n-2} - GP_{n-2} + H j(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n-2$; $P_0, P_1, \dots, P_{n-1}$ — мгновенные значения концентрации дырок в точках $0, 1, \dots, n-1$ дискретизации широкой n -базы прибора; F, G, H, B, C — постоянные, значения которых определяются электрофизическими и геометрическими параметрами прибора; $j(t)$ — мгновенное значение плотности тока.

Для получения математической модели ИР использованы результаты исследований, проведенных во Всесоюзном электротехническом институте имени В. И. Ленина [4] согласно которым процесс перематгивания ИР с достаточной для инженерной практики точностью можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} H(t) = H_0 + K_1 K_2 F^{-1}(B) U + K_3 U \int U dt; \\ F^{-1}(B) = (K_4 B(t) B_r); \\ B(t) = (\Delta B)_t - B_r; \\ (\Delta B)_t = K_1 \int U dt, \end{cases} \quad (2)$$

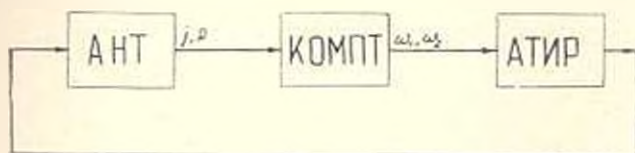
где $B, H(t)$ — мгновенные значения индукции и напряженности магнитного поля; U — напряжение; ΔB_r — средний перепад индукции за время t ; B_r — остаточная индукция, H_0 — значение H , определяемое экспериментально и равное $H = 25 \div 35 \text{ А/л}$ [4]; K_1, K_2, K_3, K_4 — постоянные, величина которых определяется такими параметрами ИР, как активное сечение стали, индукция насыщения, толщина пластины, удельное магнитное и электрическое сопротивления провода обмотки.

Третий член первого уравнения системы (2) определяет напряженность H_0 магнитного поля на поверхности стали («поверхностную» составляющую напряженности), а второй член — «вязкостную» составляющую H , воздействие которой проявляется только во втором и четвертом квадрантах прямоугольной петли гистерезиса.

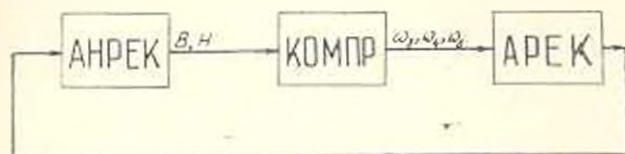
Системы уравнений (1) и (2), полученные на основе имеющихся представлений о физике явлений в моделируемых элементах преобразователя, в сочетании с условиями их решения позволяют рассматривать тиристор и ИР в качестве кусочно-гладких динамических систем, обладающих аналоговыми и дискретными свойствами.

В системе программ ELTRAN, рассчитанной на отображение динамических систем указанного типа, в качестве теоретической модели использована расщепленная кусочно-линейная система (КЛР-система). КЛР-система «Тиристор» представлена на рис. 1а, а КЛР-система «Намагничивающийся реактор» — на рис. 1б. Каждая из них имеет в своем составе аналоговую (АНТ, АНРЕК), дискретную (АТИР, АРЕК) подсистемы и связывающего их блок аналого-цифрового преобразования (КОМПТ, КОМПР).

Процессы в аналоговой подсистеме описываются вектором переменных состояния, в которую может входить любая электрическая цепь, составленная из индуктивностей, резисторов, конденсаторов, источников напряжения и тока, трансформаторов, а также идеальных ключей. Осо-



а



б.

Рис. 1. Структурная схема КИР-системы а) «Триггер»; б) «Насыщающийся резистор».

бенностью рассматриваемой подсистемы является ее способность отобразить любую функциональную цепь (ФЦ), составленную из интеграторов, сумматоров, функциональных преобразователей и ключей, и, в частности, ФЦ, описываемые системами уравнений (1) и (2).

Дискретная подсистема представляет собой конечный автомат и описывается дискретным вектором состояния. Для представления этой подсистемы в ELTRAN предусмотрен полный набор булевых функций, а также элементарный конечный автомат — триггер, что совместно с отсутствием ограничений на соединения функциональных блоков позволяет возможность отображения любого конечного автомата.

Блок аналого-цифрового преобразования состоит из множества элементарных ячеек — компараторов, каждый из которых имеет по одному аналоговому входу и дискретному выходу, возбуждающемуся при переходе входной функции $f(t)$ через нуль, т. е.: $f(t) \neq 0$, $\omega_i = 0$; $f(t) = 0$, $\omega_i = 1$.

Общая схема функционирования КИР-системы такова: выходные сигналы аналоговой подсистемы подаются на вход блока аналого-цифрового преобразования, который, исходя из характера изменения непрерывных переменных состояния, выделяет моменты переключений и формирует входные слова конечного автомата, состояние которого устанавливает значения параметров аналоговой подсистемы на очередной межкоммутационный интервал.

В качестве примера рассмотрим цифровое моделирование простейшей подсистемы Т-ЗЦ (рис. 2а), представляющей собой последователь-

ное соединение НР с тиристором, шунтированным демпфирующей RC-цепью, согласно методике ELTRAN (RC-модель). Здесь принято, что величина и форма тока через тиристор до записывания его анодного $p-n$ перехода определяется внешней цепью, т. е. реактором, а после — самим прибором, который на данном этапе процесса выключения рассматривается как генератор тока ГТ-Т.

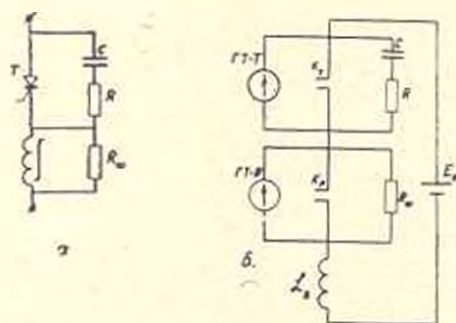


Рис. 2 а) RC-подсхема; б) моделируемая электрическая цепь (ЭЦ-RC)

Электрическая цепь, соответствующая принятым допущениям, приведена на рис. 2б, где генератор тока ГТ-Р, имитирующий НР, определяет ток через прибор до момента t_p , а ГТ-Т — после.

Далее на рис. 2б: K_p и K_T — идеальные ключи, определяющие указанное взаимодействие ГТ-Р и ГТ-Т; R и C — элементы защитной цепочки; $R_{ш}$ — шунтирующее реактор сопротивление; E_k — напряжение коммутации; $L_{\Sigma} = L_{\text{ли}} + L_{\text{м}}$ — суммарная линейная индуктивность, учитывающая остаточную индуктивность реактора $L_{\text{ли}}$ и монтажа $L_{\text{м}}$.

Совместная работа нелинейностей двоякого типа (тиристор и НР), действующих в рассматриваемой подсистеме ТЗЦ, моделируется взаимодействием двух функциональных цепей: «Тиристор» (ФЦ-Т) и «Реактор» (ФЦ-Р), показанных, соответственно, на рис. 3а и рис. 3б.

Подсистема АИТ, предназначенная для решения системы уравнений (1) с соответствующими граничными условиями [3] при $n = 7$, имеет в своем составе семь сумматоров С0—С6, два из которых (С0 и С6) решают первое и последнее уравнения системы (1), а остальные (С1—С5) предназначены для вычисления правых частей дифференциальных уравнений той же системы. Сигналы с сумматоров С1—С5 подаются на интеграторы И1—И5, на выходе которых вырабатываются текущие значения концентраций P_1, P_2 .

Подсистема КОМПТ состоит из компараторов КП1 и КП2, контролирующих значение тока I и концентрации, и управляющих ключами K_1, K_2 , при помощи которых обеспечивается реализация граничных условий, которые соответствуют текущему этапу переходного процесса. Сумматор С8 предназначен для вырабатывания величины $H(t)$, представляющей собой ток генератора ГТ-Т, выраженный в масштабе концентрации. Усилители С7 и С9 являются масштабирующими, причем

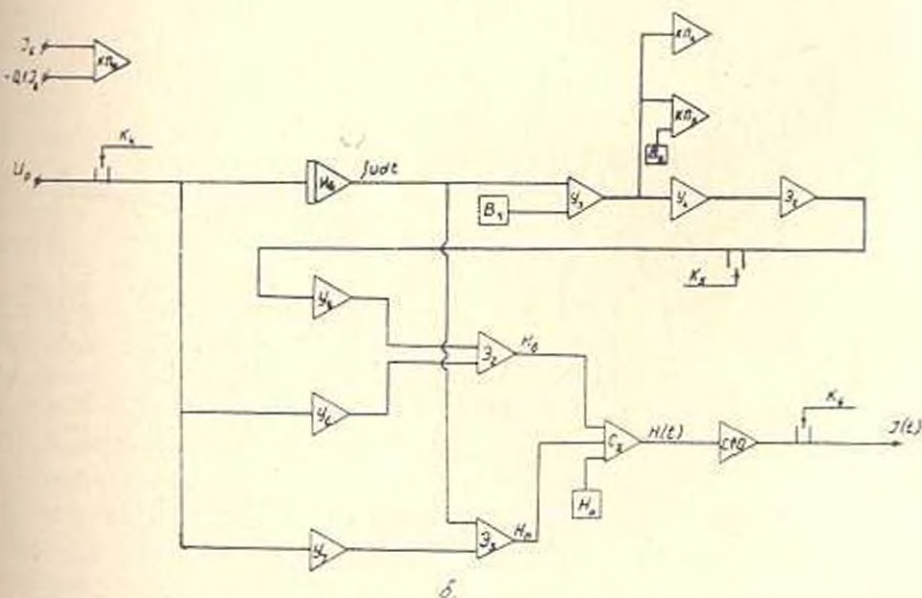
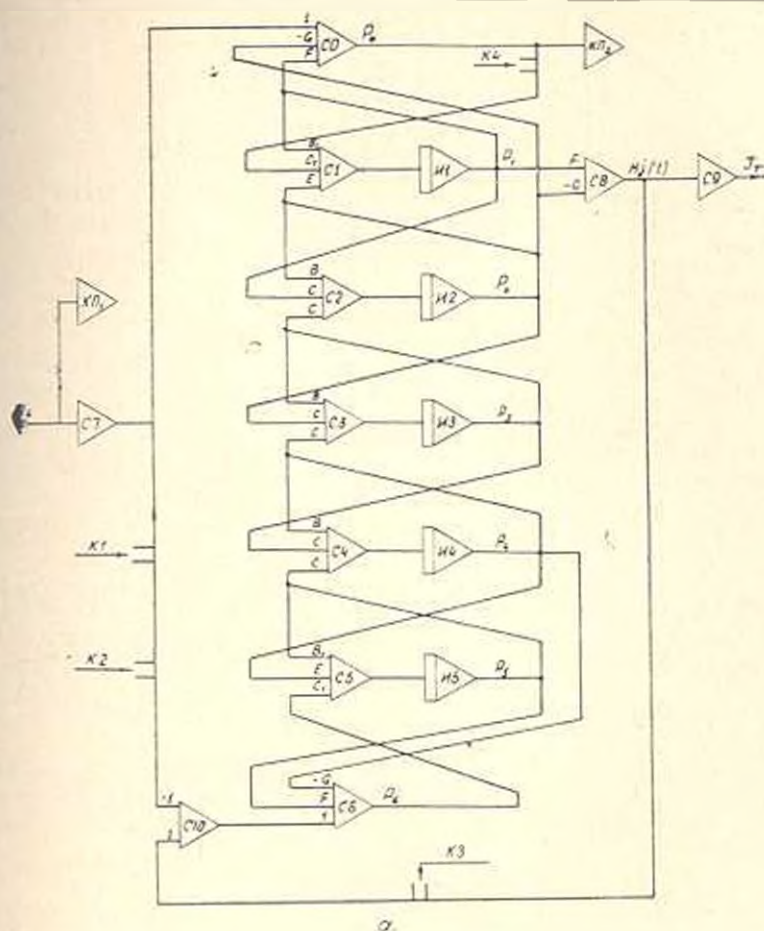


Рис. 3. Принципиальная схема КИР-системы: а) «Тиристор»; б) «Насыщающийся резактор».

функцией С7 является выражение тока в масштабе концентрации, а функция С9 — обратная.

Аналоговая подсистема АНРЕК, предназначенная для решения системы уравнений (2), реализована в виде, показанном на рис. 3б. Включение ГТР происходит путем размыкания ключа K_0 (рис. 2б) в момент, когда $H = -H_0$ ($t = t_1$). С этого момента к ФЦР начинает прикладываться напряжение и на выходе интегратора И6 происходит вырабатывание величины $\int U dt$, используемой для получения H_n и H_{nn} . Для получения H_n использованы усилители $X_1 - X_4$, а также элемент Э1, функцией которого является возведение в пятую степень.

Для получения H_{nn} необходимо умножить выходную величину усилителя Y_2 на выходной сигнал усилителя Y_1 , что осуществляется элементом Э2. Вырабатывание поверхностной составляющей H_{ps} производится с помощью усилителя Y_3 и элемента Э3. В результате суммирования всех трех составляющих H_n , H_{nn} , H_{ps} напряженности магнитного поля на выходе сумматора С, решается первое уравнение системы (2), т. е. вычисляется величина $H(t)$.

Подсистема КОМПР состоит из компараторов КП₁, КП₂ и КП₃, первый из которых контролирует момент достижения индукцией значения насыщения, второй — нулевого значения, а третий — H_0 . Ключи $K_1 - K_3$, управляемые подсистемой КОМПР, обеспечивают работу модели, соответствующую принятой логике.

Форма тока через прибор в процессе его выключения, полученная в результате испытаний рассмотренной модели, показана на рис. 4.

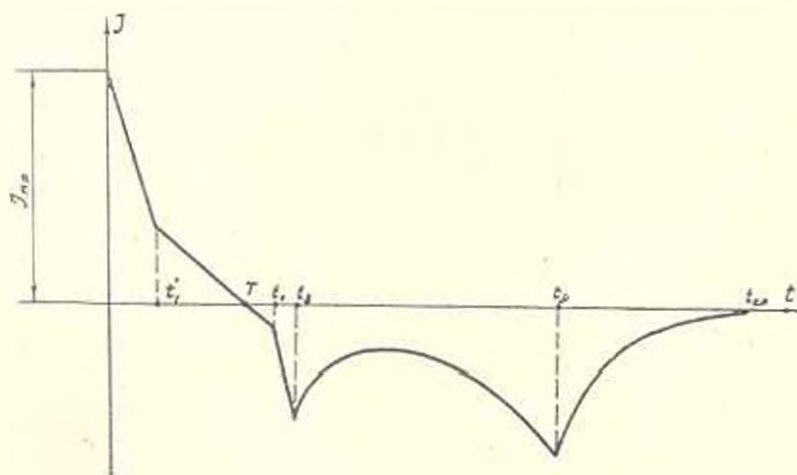


Рис. 4. Картина переходного процесса выключения тиристора.

Здесь изменение тока в интервале времени $t_1 - t_2$ обусловлено работой реактора в режиме линейной индуктивности ($B = B_s$). Если в подинтервале $t_2 - t_3$ спад тока определяется лишь линейной индуктивностью $L_1 = L_0 - L_n$, то в $t_3 - t_4$ индуктивности L_1 присвоено значение $2L_0 - L_n$.

В момент t_1 происходит включение ГТ-Р (рис. 2б). В момент t_2 достижения P_0 у анодного $p-n$ перехода тиристора нулевого значения происходит включение генератора ГТ-Т, что осуществляется посредством перевода ФЦТ (рис. 3а) в режим генерирования тока J_1 .

Описанная методика моделирования использована для машинного расчета перенапряжений, возникающих на тиристоре в RC-подсхеме (рис. 2а) в ходе выключения прибора при различных значениях элементов демпфирующей цепочки R и C.

Так, например, в случае использования ИР с материалом магнитопротода 50НП-0,5 при $H=30$ А/м, $B_1 = 1,41$ Тл, $B_2 = 1,45$ Тл, тиристора марки ТБ-400 при значениях $R=20$ Ом, $C=0,25$ мкФ и напряжении коммутации $E_c = 310$ В, абсолютное значение перенапряжения на тиристоре согласно данным моделирования составило $\Delta U_T = U_{max} - E_c = 55$ В. Время счета на ЦВМ ЕС-1020 при этом — не более 15 мин.

Цифровое моделирование подешем Т-3Ц согласно методике EITRAN с применением моделей тиристора и реактора рассмотренных типов создает возможность машинного анализа взаимосвязей самых разнообразных электрофизических и конструктивно-технологических параметров, характерных для различных элементов схемы преобразователя. Последнее в свою очередь может служить реальной основой для машинного решения широкого класса оптимизационных задач в отношении не только подешем Т-3Ц, но и всего преобразователя в целом по различным критериям, независимо от топологической сложности моделируемой схемы, а также количества нелинейности типа «Тиристор» и «Насыщающийся Реактор».

Ерлш им. К. Маркса

Поступило 22 XII 1978

Վ. Լ. ՄԻՈՒՅԱՆ

«ՏԻՐԻՍՏՈՐ-ՊԱՇՏՊԱՆԻՉ ՀԳՐԱ» ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ԵՐԿՐԻՄԻՆԻՍՏ ՏԵԳԻ ՈՐԵՆՑՈՂ ԱՆՑՈՂԻԿ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՔՎԱՆՏԻ, ԽՈՐԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. ի. մ.

Ինվարպրված է «Տիրիստոր-պաշտպանիչ շղթա» (S-ՊԵ) էնթախեմա-եերում այն անցողիկ պրոցեսների մոդելավորումը, որոնք տեղի են ունենում տիրիստորի անջատման ընթացքում: Մուլթ է տրված մոդելավորման ապա-դործված եղանակի կիրառման նարավորությունը լայն դասակարգի S-ՊԵ էնթախեմաների մերլործման ծրագրերի ստացման համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Мустафи Г. М., Ширанин Н. М., Тимашев В. Н. Система программ для моделирования устройств преобразовательной техники. «Электротехника», 1978, № 6.

2. Кузьмин В. А., Мустафа Г. М., Минасян В. Л. Моделирование переходного процесса выключения тиристора на АВМ. «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1978, № 3.
3. Кузьмин В. А., Минасян В. Л. Высокочастотная аналоговая модель процесса выключения тиристора. «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1978, № 5.
4. Кирасев В. В., Чоанов В. А. Расчет параметров демпфирующих цепей и задерживающих реакторов инвертора тока. «Электротехника», 1977, № 6.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. Р. ВАРДАНИН

БЫСТРОДЕПСТВУЮЩИЕ ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ
УДАРНЫХ ВОЛН

Давление воздушной ударной волны (ДВУВ), мгновенно нарастая, медленно падает примерно по экспоненциальному закону (положительная фаза с длительностью t_{1+}). После прохождения воздушной волны наступает разрежение, при котором давление становится меньше атмосферного (отрицательная фаза) [1], поэтому регистрация ДВУВ требует применения первичных преобразователей, способных работать в динамическом и статическом режимах [1, 2]. Для анализа можно положительную фазу с большой точностью аппроксимировать экспонентой [3]:

$$P(t) = P_m e^{-\alpha t}, \quad (1)$$

где P_m — пиковое значение ДВУВ; $\alpha = \frac{3+1}{t_{1+}}$ — коэффициент затухания, величина которого определяется опытным путем.

Сигнал в форме (1) воспринимается чувствительным элементом датчика. Точность воспроизведения формы ДВУВ зависит от правильного выбора собственной частоты чувствительного элемента преобразователя. Передача сигнала (1) к чувствительному элементу датчика и его воспроизведение можно оценить с помощью частотного спектра данного сигнала [4]. Функция (1) удовлетворяет условию применимости преобразования Фурье и ее спектральная плотность равна:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{P_m}{\alpha + i\omega} = \frac{P_m}{1} \frac{e^{-i\omega t_0}}{\alpha^2 + \omega^2}. \quad (2)$$

Полная энергия спектра сигнала будет [4]:

$$E_{\text{полн}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{P_m}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \right)^2 d\omega = \frac{P_m^2}{2\alpha}. \quad (3)$$

С помощью равенства Парсеваля нетрудно вычислить энергию в заданной полосе частот. Пусть «техническая» ширина спектра равна $\Delta\Omega$ ($-\Omega_1 + \Omega_1$), а энергия, сосредоточенная в этой полосе [4]:

$$E_{\text{сиг}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\Omega)|^2 d\Omega = \frac{P_m}{\alpha} \arctg \frac{\Omega_1}{\alpha}. \quad (4)$$

Энергия сигнала $E_{\text{сиг}}$ составляет $\frac{2}{3}$ часть полной энергии, т. е. $E_{\text{сиг}} = \frac{2}{3} E_{\text{полн}}$. Из сравнения (3) и (4) можно получить спектр угловой частоты передаваемого сигнала

$$\Omega_1 = \alpha \operatorname{tg} \left(\frac{3\pi}{2} \right). \quad (5)$$

Численные результаты для граничной частоты спектра сигнала $f_{\text{гп}} (\text{кГц})$ при различных значениях β и $t_{(i+1)}$ (мкс) приведены в табл. (значение α взято $\frac{3,6}{t_{(i+1)}})$.

Таблица

$\beta = 0,95$	$t_{(i+1)}$	0,2	1	2	3	4	5
	$f_{\text{гп}}$	35,45	7,1	3,05	2,44	1,83	1,45
$\beta = 0,96$	$t_{(i+1)}$	0,2	1	2	3	4	5
	$f_{\text{гп}}$	45,38	9,1	4,5	3,05	1,82	1,27
$\beta = 0,97$	$t_{(i+1)}$	0,2	1	2	3	4	5
	$f_{\text{гп}}$	60,8	12,2	6,1	4,06	3,02	2,11

Для неискаженной записи импульсов малой длительности необходимо иметь первичные преобразователи с собственной частотой колебаний чувствительного элемента больше, чем граничная частота спектра [5, 6]:

$$f_0 = (3 \div 5) f_{\text{гп}}. \quad (6)$$

Из-за инерционности датчика возникает передний фронт выходного сигнала, вследствие чего появляется погрешность измерения пикового значения:

$$\delta = \frac{\Delta P}{P_m} \cdot 100\% \approx (1 - e^{-\frac{1-\beta}{t_{(i+1)}} t_{\text{ф}}}) \cdot 100\%. \quad (7)$$

Длительность фронта зависит от собственной частоты чувствительного элемента. При $t_{\text{ф}} = 25$ мксек по выражению (7) погрешность пикового значения ДВУВ составит $\delta = (3,6 \div 5,0)\%$. Как показывают расчеты, для регистрации пикового значения импульса ДВУВ с длительностью 1 мксек и допускаемой погрешностью 5% собственная частота первичного чувствительного элемента должна быть $f_0 = 71,2$ кГц.

Для регистрации импульсных давлений могут быть применены разные датчики (резонаторные, емкостные, пьезоэлектрические, тензоре-

зисторные и др.) [1, 2, 7]. Емкостные датчики (ЕД) по ряду преимуществ выгодно отличаются от остальных.

В [2] описана конструкция универсальной измерительной емкостной головки, где возможно применение мембран разной толщины и материалов, позволяющих получить датчики разных пределов измерения. Недостатками указанного датчика являются недостаточная герметичность и нежесткое заземление мембран к корпусу. Из-за последнего эксперименты по определению величины f_0 показали, что имеется значительное расхождение между теоретическими и экспериментально определенными частотами.

На основании экспериментальных данных можно в общезвестную формулу определения f_0 внести поправку μ^2 :

$$f_0 = \frac{K^2 \rho^2 h}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho}}, \quad (8)$$

где $K = 3,196$ — коэффициент частоты; $\nu = \sqrt{\frac{f_p}{f_0}}$ — поправочный коэффициент, определяемый по экспериментальным и расчетным частотам упругого элемента f_0 , f_p ; r , h — радиус и толщина мембраны; ν — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости; ρ — плотность материала.

Коэффициент μ характеризует расхождение между расчетной и экспериментально определенной частотами. Для ЕД с вставными мембранами [2], в среднем $\mu = 0,72$.

Повышение собственной частоты колебания можно получить при применении цельнометаллических колпачков-мембран. Результаты испытаний ЕД с головками по рис. 1, а и б показали, что поправочный коэффициент для цельнометаллических колпачков $\mu = 0,81$, т. е. значительно выше, чем при вставных мембранах. Эти датчики по сравнению с [2] отличаются по емкостным головкам и по конструкции в целом. Неподвижный изолированный электрод 2 (рис. 1, а) закрепляется в верхней части корпуса 4. На этот корпус навинчивается колпачок-мембрана 1, положение которого фиксируется контргайкой 3. При помощи шайбы из медной фольги, прокладываемой между верхней поверхностью корпуса и колпачком, обеспечивается необходимый емкостной зазор. С нижней стороны защитного экрана 6 закрепляется аналогичная емкостная компенсационная головка (элементы 11—14). Внизу корпуса измерительной головки 4 прикрепляется печатная плата 7. С помощью 8 печатной платы, через отверстие 9 припаивается штырь компенсационной емкостной головки. В связи с очень большой чувствительностью, компенсационная головка дополнительно предохраняется защитным колпачком 15. Питание и вывод сигнала ЕД осуществляется проводами с боковой стороны датчика через муфту сальника 5.

На рис. 1, б показан ЕД, предусмотренный для измерения импульсных сигналов в закрытых объемах. Преимуществом такого датчика является наличие плоской измерительной головки, столь необходимой

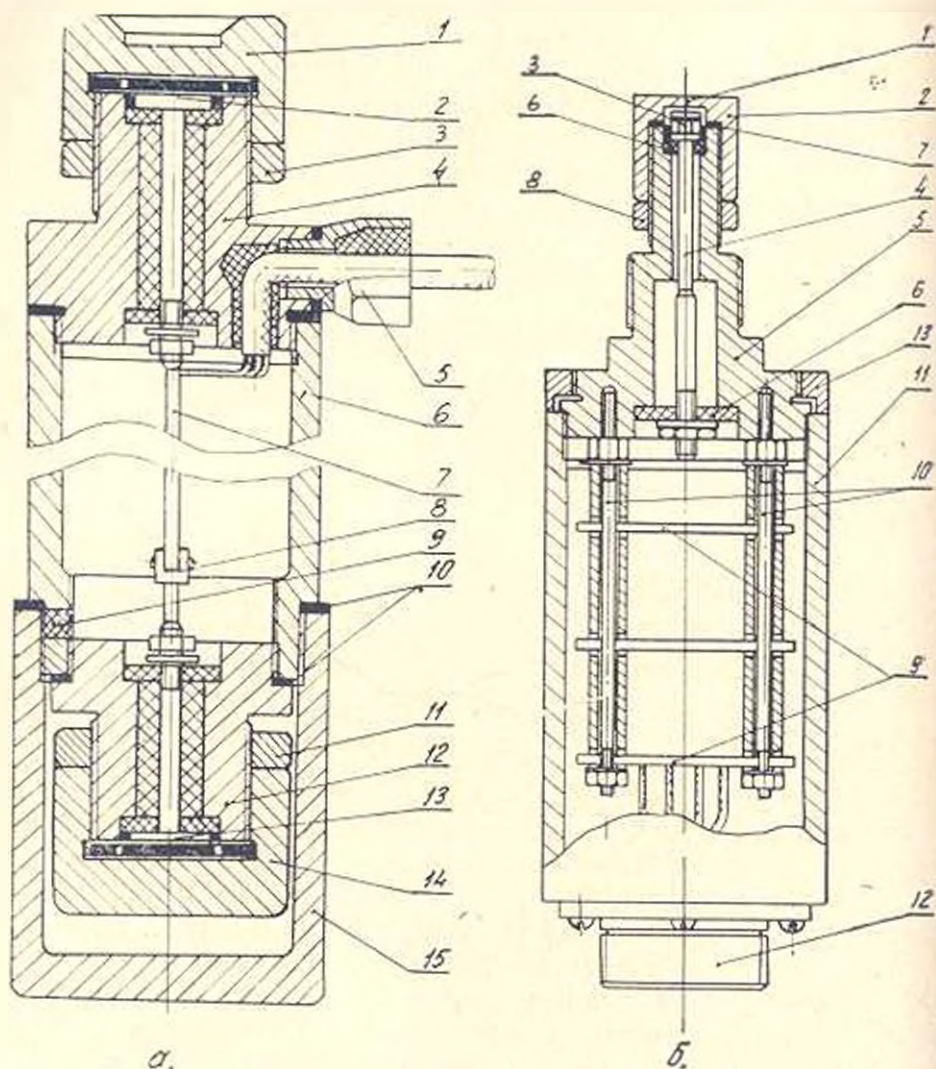


Рис. 1.

для регистрации проходящего ДВУВ, и малые габаритные размеры. Колпачок-мембрана 1 внутри имеет цилиндрическое углубление, позволяющее одинаково регистрировать как давление, так и разрежение. Детали измерительной емкостной головки такие же, что и для датчика с компенсационной головкой (рис. 1, а). Схема измерения собрана на двух дискообразных печатных платах 9, закрепленных с корпусов 5 шпильками 10. Между двумя платами имеется экран из латуни. Выводы осуществлены с нижней стороны цилиндрического корпуса 11 через разъем 12. Корпус измерительной головки 5 с экраном 11 закрепляется контргайкой 13, необходимой при ударных нагрузках. Для повышения чувствительности рассмотренных датчиков часть воздушного зазора заменяется слоем слюды определенной толщины.

Схема измерения обоих ЕД состоит из высокочастотного генера-

тора с кварцевой стабилизацией, измерительного моста, операционного усилителя на микросхеме и согласующего устройства в виде эмиттерного повторителя [3].

Неинвертирующий вход операционного усилителя подключен к потенциометру, который позволяет каждый раз перед экспериментом на выходе схемы установить необходимое напряжение. Такая возможность и наличие компенсационной головки (рис. 1, а) позволяют нормальную работу ЕД при изменении температуры окружающей среды в пределах $-20^{\circ}\text{C} \div +35^{\circ}\text{C}$. При помощи специально разработанной установки в климатической камере, в динамическом режиме для указанного диапазона температур, проверено изменение чувствительности датчика, которое не превышало $2 \div 3\%$.

Для регистрации положительной и отрицательной фаз ДВМВ на выходе датчика устанавливается напряжение величиной $U_{\text{max}} = 1,5 \text{ В}$. При других выходных напряжениях чувствительность ЕД несколько меняется.

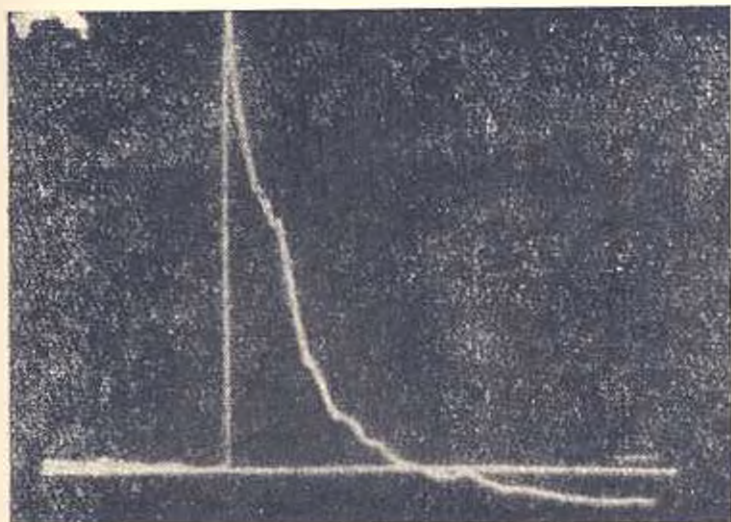


Рис. 2.

При дюралюминиевых мембранах с диаметром 18 мм, толщиной 2 мм и 3 мм (рис. 1, а) экспериментально определены собственные частоты колебания, соответственно, были 41 и 59 кГц. Указанные датчики изготовлены для двух пределов давлений $-0,1 \div 1,5 \text{ В/кгс/см}^2$ и $0,2 \div 0,3 \text{ В/кгс/см}^2$.

Кольчатые мембраны датчика рис. 1, б были изготовлены из сплава титана (ВТ-14, ВТ-15); при диаметре 8 мм и толщине 1 мм, они показали собственную частоту колебаний в пределах 87—95 кГц. Они также были предназначены для двух диапазонов давления: $0,5 \div 30 \text{ кгс/см}^2$ и $10 \div 150 \text{ кгс/см}^2$ с чувствительностью, соответственно, $0,15 \div 0,2 \text{ В/кгс/см}^2$ и $\sim 0,05 \text{ В/кгс/см}^2$.

ЕД рис. 1, б при наличии охлаждающей водяной рубашки в цилиндрического корпуса позволили нормальную работу в дизелях при температуре измерительной головки в пределах $+20^{\circ}\text{C} \div +100^{\circ}\text{C}$ и показали вполне удовлетворительные результаты.

Компенсационные ЕД по рис. 1, а в полевых условиях были испытаны для регистрации ДВУВ (осциллограмма на рис. 2). Для дюралюминиевых мембран толщиной 2 мм фронт зарегистрированных волн не превышал 25 мксек. Максимальная погрешность по пиковому значению импульса составила менее $(1 \div 5)\%$. Запись осциллограмм, полученных при регистрации падающего шарика на мембрану (рис. 1, б), показала, что полученный фронт не превышает $10 \div 12$ мксек.

ЕД градуировались на гидрпрессе и имели линейную зависимость «ВХОД — ВЫХОД».

Վ. Բ. ՎԱՐԴԱՆԻԱՆ

ՕՊԻ ՀԱՐԿԱՌԱՅԻՆ ԱՎԻՐԵՐԻ ԺԱՇՈՒՆ ԿՐԱՆՅՈՒՆ ԱՐԱԿԱՌՈՐԻ ՈՒՆԱՐԱՅԻՆ ՀԱՅՏՆԵՉԱԿՐ

Ա. Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հողվածում դիտվում են օդի հարվածային ալիքների ճնշման (ՅՀԱՃ), գրանցման ժամանակ պայտյուն էլեմենտների սեփական առատանումների համախառնության որոշման հարցերը Բերվում են մեմբրանների սեփական առատանումների համախառնության որոշման ճշգրտման պարզակիցները: Դիտվում են ունակային հայտնիքի (ՈՐՀ) երկու կոնստրուկցիաներ, որոնցից մեկը խաղողոված է կոմպլեքսավորող պիսիկով և ապահովում է նրա նորմալ աշխատանքը: Բարդ կլիմայական պայմաններում ջերմաստիճանի մեծ անկման ժամանակ (-20°C մինչև $+35^{\circ}\text{C}$): Դինամիկական սեփմում, նշված սահմանների համար պայտյունության փոփոխությունը կազմում է ընդամենը $2-3\%$: Մշակված հայտնիչները ունեն բարձր փոքրակայունություն և ամրություն: Դյուրալյումինումից պատրաստված մեմբրանները հնարավորություն են տալիս գրանցելու ՅՀԱՃ, որի աղղման հակառակ մեծ չէ 25 մկվրկ: Տիտանի համաձուլվածից պատրաստված մեմբրանները, որոնց պայտյուն էլեմենտի տրամագիծը 2 մմ է, իսկ հաստությունը 1 մմ, ունեն $87 \div 95$ կճց սեփական առատանումների համախառնություն:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Андреев К. К., Беленя А. Ф. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960.
2. Вардanian В. Р. и др. Емкостной датчик для регистрации параметров давления воздушных ударных волн. «Приборы и системы управления», 1975, № 6.
3. Разработка измерительных преобразователей импульсных давлений. Отчет инв. ном. Б612056, ЕрПН, 1977.

4. Голоройский И. С. Разностные цепи и сигналы. М., «Советское радио», 1971.
5. Недин В. В., Крицкий В. А. Измерение давлений, возникающих при взрыве металлических порошков в статических взрывных камерах. Киев, «Наукова думка», 1971.
6. Болодкин Ю. Н. Методы анализа и расчеты динамических погрешностей первичных преобразователей при помощи периодических и одиночных импульсов. Автореф. канд. диссерт. Новосибирск, 1969.
7. Варданян В. П. Термодатный резонаторный датчик давления воздушных ударных волн. «Приборы и системы управления», 1973, № 11.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. О. ВАНУНИ, С. Д. ТРИФОНОВ

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДИАМЕТРА ПРОВОЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Фотоэлектрические устройства, применяемые для измерения диаметра провода и толщины изоляционного покрытия, чрезвычайно разнообразны в отношении конструктивного исполнения и схем модуляции светового потока. Наряду с механической модуляцией в измерительной технике стали применять модуляцию, осуществляемую изменением параметров самого излучателя, что позволило повысить точность измерений и увеличить их эксплуатационную надежность [1].

В работе рассматриваются процессы, протекающие в фотоэлектрическом устройстве для измерения диаметра проволочных материалов и толщины изоляционных покрытий, в котором используется двухканальный электрооптический модулятор. В одном из его каналов имеется дополнительный сдвиг по фазе. Светочувствительный элемент реагирует на суммарный световой поток от двух модулированных источников излучения, величина перекрытия каждого из которых контролируется объектом, расположенным между фотоприемником и источниками излучения, однозначно определяет его размер и положение в пространстве [2].

Этапы последовательной обработки сигнала в измерительной цепи и цепи обратной связи следящей системы устройства представлены на рис. 1.

Передаточная функция рассматриваемого устройства может быть определена с учетом характера изменения светового потока, излучаемого лампой накаливания. Приближенное описание динамики тепловых процессов в лампе и характера изменения излучаемого светового потока можно получить методами электрического моделирования [3].

Если рассматривать лампу накаливания с вольфрамовой нитью как инерционное звено и пренебречь потерями энергии за счет конвективных процессов и теплопроводности токоподводящих стержней лампы, то электрический аналог, моделирующий тепловой процесс в лампе, можно представить схемой замещения в виде параллельно включенных емкости C и резистора R , имеющих смысл теплоемкости и радиационного сопротивления.

В этом случае радиационное сопротивление равно

$$R = \frac{T - T_0}{E} = \frac{T - T_0}{\pi S (T^4 - T_0^4)}, \quad (1)$$

где T_0 , T — начальная и текущая температуры нити накаливания; σ — постоянная Стефана—Больцмана; E , ϵ , S — энергия, коэффициент и площадь поверхности излучения.

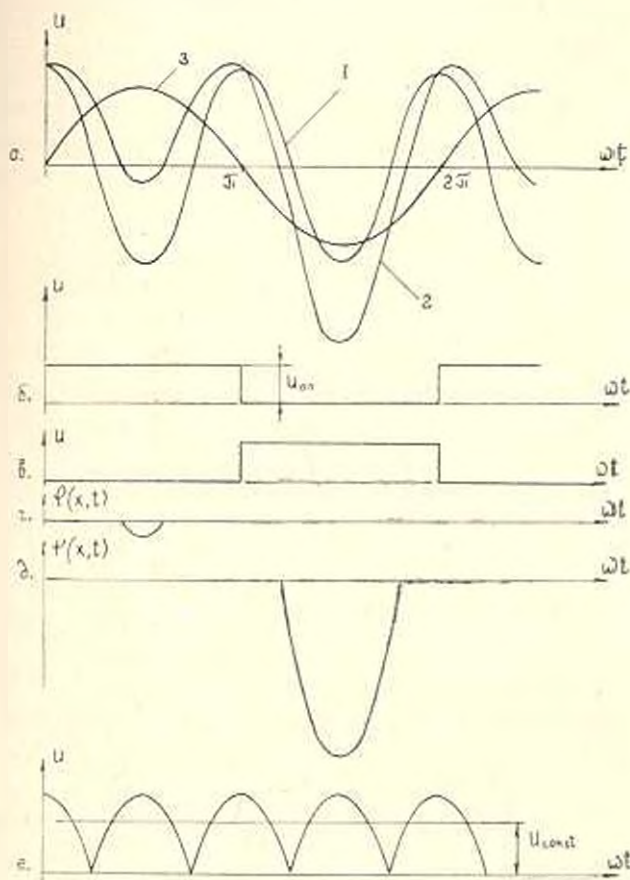


Рис. 1

Передаточная функция рассматриваемого звена в операторной форме (по Лапласу—Карсону) имеет вид

$$z = \frac{(T - T_0)p}{\sigma S(T - T_0)(1 + CRp)} \quad (2)$$

С учетом того, что $T \gg T_0$, выражение (2) упрощается

$$z = \frac{p}{\sigma ST^2(1 + CRp)} \quad (3)$$

На вход одного из каналов электрооптического преобразователя (инерционного RC-звена) подается сигнал вида $U = U_0 \sin \omega t$ при $0 \leq \omega t \leq \pi$ и $U = 0$ при $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$, а на вход другого — со сдвигом по фазе на π . Мощность, подводимая к лампе накаливания для одного канала равна

$$P_1(t) = P_0 \begin{cases} \sin^2 \omega t, & 0 \leq \omega t \leq \pi, \\ 0, & \pi \leq \omega t \leq 2\pi, \end{cases} \quad (4)$$

а для другого —

$$P_2(t) = P_0 \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega t \leq \pi, \\ \sin^2 \omega t, & \pi \leq \omega t \leq 2\pi. \end{cases} \quad (5)$$

Разлагая выражения (4) и (5) в ряд Фурье и пренебрегая членами высшего порядка, получим для обоих каналов, соответственно:

$$P_1(t) = P_0 (A + B \sin \omega t - D \cos 2\omega t); \quad (6)$$

$$P_2(t) = P_0 (A - B \sin \omega t - D \cos 2\omega t). \quad (7)$$

Операторное уравнение для температуры T с учетом (3) имеет вид

$$T'(p) = \frac{P}{\pi S(1 + CRp)} P(p). \quad (8)$$

Подставив выражения (6) и (7), предварительно записав их в операторной форме, в уравнение (8), получим:

$$T_1(p) = \frac{P_0 p}{\pi S(1 + CRp)} \left(A - B \frac{\omega p}{\omega^2 + p^2} - D \frac{p^2}{4\omega^2 - p^2} \right); \quad (9)$$

$$T_2(p) = \frac{P_0 p}{\pi S(1 + CRp)} \left(A - B \frac{\omega p}{\omega^2 + p^2} - D \frac{p^2}{4\omega^2 - p^2} \right). \quad (10)$$

Обозначив постоянную времени инерционного звена $RC = \tau$ и полагая процесс установившимся ($t \rightarrow \infty$), найдем оригиналы операторных функций:

$$T_1(t) = \frac{P_0}{\pi S} \left(A - \frac{B}{\tau} \sin \omega t + \frac{D}{2\tau} \cos 2\omega t \right); \quad (11)$$

$$T_2(t) = \frac{P_0}{\pi S} \left(A + \frac{B}{\tau} \sin \omega t + \frac{D}{2\tau} \cos 2\omega t \right). \quad (12)$$

Постоянную времени τ в общем случае следует рассматривать как функцию температуры нити накаливания $\tau = R(T)C(T)$, причем величина τ оказывает влияние только на амплитуды переменных составляющих температуры T_1 и T_2 . Однако, если учесть, что $T_{2m} < T_m < T_s$, где T_s — средняя температура нити, то при расчете характеристик излучения в качестве T можно принимать среднюю температуру T_s и по ней определять величины теплоемкости и подводимой мощности.

Поскольку излучаемая энергия в единицу времени (без учета потерь на теплопроводность элементов лампы и конвективный теплообмен) равна подводимой мощности $\sigma \epsilon ST_s^4$, выражение для потока, получаемого одной нитью лампы накаливания, можно представить в виде

$$\Phi_1 = P_0 \left(A - \frac{B}{\tau} \sin \omega t + \frac{D}{2\tau} \cos 2\omega t \right). \quad (13)$$

а для второй нити (с учетом фазового сдвига питающего напряжения):

$$\Phi_2 = P_0 \left(A + \frac{B}{\tau} \sin \omega t + \frac{D}{2\tau} \cos 2\omega t \right). \quad (14)$$

Световые потоки Φ_1 и Φ_2 проецируются на светочувствительную поверхность одного фотоприемника, причем величина перекрытия каждого из них определяется диаметром провода и его положением в пространстве. Суммарный световой поток, падающий на фотоприемник, равен

$$\Phi = \Phi_1 \left(1 - \frac{b+x}{a} \right) + \Phi_2 \left(1 - \frac{b-x}{a} \right), \quad (15)$$

где $2b$ — толщина провода; $2a$ — ширина щелевой диафрагмы фотоприемника; x — величина смещения проекции провода относительно оси симметрии диафрагмы фотоприемника.

Полагая, что ток, протекающий через фотоприемник, пропорционален величине светового потока ($I = \mu\Phi$), падение напряжения на нагрузке R_n равно

$$U = IR_n = \mu\Phi R_n. \quad (16)$$

Подставив в (16) значения Φ_1 , Φ_2 и Φ из (13) — (15) и учитывая, что сигнал, проходя через разделительный конденсатор, освобождается от постоянной составляющей и усиливается аperiodическим усилителем с коэффициентом усиления k , получим аналитическое выражение сигнала на выходе усилителя

$$U = f(x, t) = k\mu R_n P_0 \left[-2B \frac{x}{a} \sin \omega t + D \left(1 - \frac{b}{a} \right) \cos 2\omega t \right] \cdot \frac{1}{\tau}. \quad (17)$$

Зависимость (17) показана на рис. 1а для значений $x/a = 0$ и 0,2 при $b/a = 0,5$ (кривые 1 и 2); кривая 3 соответствует опорному напряжению U_m на входах схем совпадения устройства (рис. 1б, в).

Приравняв производную $f'(x, t)$ нулю и решив уравнение относительно ωt , получим

$$\omega t = \frac{\pi}{2} + n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (18)$$

За критерий предельно допустимого перемещения провода с измерительной позиции можно считать отсутствие одного из максимумов кривой, описываемой выражением (17).

Подставив значение (18) при $n = 0$ и $n = 1$ в (17), можно записать, что максимальные значения сигналов обратной связи на выходах схем совпадения $\varphi(x, t)$ и $\psi(x, t)$ (рис. 1г, д) равны:

$$\varphi_{\max}(x) = k\mu R_n P_0 \left[-2B \frac{x}{a} + D \left(1 - \frac{b}{a} \right) \right] \cdot \frac{1}{\tau}; \quad (19)$$

$$\psi_{\max}(x) = k_n R_n P_0 \left[2B \frac{x}{a} - D \left(1 - \frac{b}{a} \right) \right] \frac{1}{\gamma} \quad (20)$$

Разность функций (19) и (20) используется в цепи обратной связи привода поперечного перемещения устройства для совмещения осей симметрии фотоприемника и контролируемого провода.

Передаточная функция при этом записывается:

$$\gamma = \frac{4 k_n R_n P_0 B}{a \tau} x, \quad (21)$$

а выпрямленный измерительный сигнал имеет вид, представленный на рис. 1е.

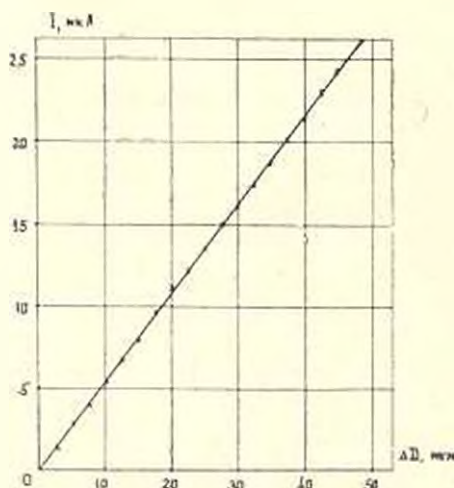


Рис. 2.

Применение замкнутой следящей системы с передаточной функцией, пропорциональной входному воздействию, позволяет за счет несущественного усложнения механики измерительного устройства упростить схемное исполнение и улучшить его метрологические характеристики.

Экспериментальные исследования устройства показали (рис. 2), что оно имеет линейную выходную характеристику, помехоустойчиво при измерении диаметральных размеров проволоочных материалов и толщины нанесенных на них изоляционных покрытий обеспечивает чувствительность порядка 500 мкА/мкА.

ВНИИЭлектронпривод

Получено 20.VI.1973

Վ. Ն. ՎԱՆՈՒՆ, Ս. Դ. ԳՐԻՖՈՆՈՎ

ՄԵՏԱՎԱԿԱՐԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՏՐԱՄԱԿՈՒ ՅՈՏՈՒՆԵՑՐԱԿԱՆ ՉԱԿԻՉ

Ա. Վ. Վ Ա Ն Վ Ն Վ

Քննարկվում է մետաղալարային նյութերի տրամագծի չափումը Ֆոտոէլեկտրական երկկանալային ամպլիտուդա-ֆազային փոխակերպիչի միջոցով, որի մեկ կանալում զոդայնուն ունի ֆազի լրացուցիչ տեղադրած:

Բերված են էլեկտրաօպտիկական փոխակերպիչի փոխանցական ֆունկցիայի հաշիվներ, նկատի ունենալով լույսի աղբյուրի չնրմային պրոցեկտիվիաներին, և նրա փորձառական ստուգման արդյունքները:

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронцов Л. Н. Фотозлектронные системы контроля линейных величин. М., «Машиностроение», 1965.
2. Гаушко А. Б. и др. Устройство для определения координат центра отверстия детали. Авт. свид. 313078. М. кл. G 01 B 11/02, 1971.
3. Камбелл Д. П. Динамика процессов химической технологии. М., ГИТХЛ, 1962.

ГИДРАВЛИКА

М. А. АКОНЯН, Г. М. ТОРГОМЯН

РАСЧЕТ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ОЗЕРА СЕВАН МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для изучения численными методами циркуляции вод оз. Севан прием квазигеострофический баланс сил и воспользуемся линейной династической моделью [1].

Рассмотрим водоем, наполненный бароклинной жидкостью. Форма береговых очертаний и рельефа дна произвольны, береговые границы — твердые. На поверхности водоема задано касательное напряжение ветра. На поверхности принимается условие отсутствия вертикальной составляющей скорости

$$\omega_{z=0} = 0,$$

а на дне водоема — условия прилипания

$$u_{z=-H} = v_{z=-H} = \omega_{z=-H} = 0. \quad (2)$$

Пренебрегая притоком и стоком в озеро, принимается условие непротекания воды через твердые границы водоема, т. е. приравнивается нулю нормальная составляющая полного потока

$$\int_0^H u \, dz = 0 \quad \text{или} \quad \int_0^H v \, dz = 0. \quad (3)$$

Тогда вычисление скоростей течения может быть сведено к задаче определения уровней поверхности $\zeta(x, y)$ или функции полных потоков $\psi(x, y)$ [1].

Линейная диагностическая модель динамики внутреннего водоема представляет собой линейное дифференциальное уравнение эллиптического типа II порядка для $\psi(x, y)$ (или $\zeta(x, y)$) и соотношений для определения по $\psi(x, y)$ (или $\zeta(x, y)$) горизонтальных составляющих скоростей u и v :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\alpha} \Delta \zeta - \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \\ = \frac{H}{l_0 \alpha} \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right) - \frac{q}{2\alpha l_0 l} \int_0^H z \zeta \, dz - \\ - \frac{g}{l_0 l} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \int_0^H z \frac{\partial \zeta}{\partial x} \, dz - \frac{\partial H}{\partial x} \int_0^H z \frac{\partial \zeta}{\partial y} \, dz \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Так как на границе водоема расходы воды приравнены нулю, то для $\psi(x, y)$ имеем граничное условие $\psi_r(x, y) = 0$.

Начало координат помещено на невозмущенной поверхности водоема, ось x направлена с запада на восток; y — с юга на север, z — вертикально вниз; Δ — плоский оператор Лапласа; ρ — аномалия плотности; $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$; $l = 2\omega \sin \varphi$ — параметр Кориолиса; ν — коэффициент вертикального турбулентного обмена; τ_x и τ_y — тангенциальные напряжения ветра; H — глубина; $\alpha = \sqrt{\frac{l}{2\nu}}$.

Хотя задача определения циркуляции в водоемах сводится к определению одной из двух равнозначных функций: уровня поверхности $\xi(x, y)$ или функции полных потоков $\psi(x, y)$, в работе предпочтение отдано последней. В основном, это определялось простотой граничного условия $\psi_r = 0$, тогда как $\xi_r(x, y)$ на границе необходимо определять из системы дифференциальных уравнений 1 порядка [1].

Для численного моделирования циркуляции оз. Севан покрыто трехмерной сеточной областью. По вертикали озеро разделено на 12 горизонтов (0, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 м) и на каждом из них нанесена сетка шагом в 1 км. Данная сеточная область, на наш взгляд, является оптимальной для озера Севан, достаточно подробна как для описания термических и динамических характеристик озера, так и для численного решения уравнения (4) методом сеток, позволяя эффективно использовать оперативную память ЭВМ, не усложняя программу расчетов. Составление разностной схемы, аппроксимация левой и правой частей уравнения (4) и итеративный метод решения полученной системы алгебраических уравнений методом Гаусса—Зейделя достаточно подробно изложен в [1].

По рассчитанному полю функции полных потоков $\psi(x, y)$ можно вычислить горизонтальные составляющие скоростей течения на каждом из расчетных горизонтов по формулам:

$$u(x, y, z) = \frac{e^{-\alpha^2 z}}{2\alpha\rho_0\nu} [(\tau_x + \tau_y) \cos \alpha z + (\tau_y - \tau_x) \sin \alpha z] + \frac{\tau_x}{l_0 H} - \frac{1}{H} \frac{\partial \psi}{\partial y} + \frac{\kappa}{\rho_0 l} \left[\int_z^H \frac{\partial \tau_y}{\partial y} dz - \frac{1}{H} \int_0^z z \frac{\partial \tau_y}{\partial y} dz \right]; \quad (5)$$

$$v(x, y, z) = \frac{e^{-\alpha^2 z}}{2\alpha\rho_0\nu} [(\tau_x + \tau_y) \sin \alpha z - (\tau_y - \tau_x) \cos \alpha z] + \frac{\tau_y}{l_0 H} + \frac{1}{H} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\kappa}{\rho_0 l} \left[\int_z^H \frac{\partial \tau_x}{\partial x} dz - \frac{1}{H} \int_0^z z \frac{\partial \tau_x}{\partial x} dz \right]. \quad (6)$$

Малый шаг сетки по горизонтали (1 км) позволяет определять вертикальную составляющую скорости $w(x, y, z)$ непосредственно из уравнения неразрывности. Для $w(x, y, z)$ заданы два граничных условия—

на поверхности и на дне. Чтобы использовать одновременно оба граничных условия, повышаем порядок уравнения неразрывности, дифференцируя его по z :

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right). \quad (7)$$

Производные в правой части уравнения (7) аппроксимируются центральными разностями.

На ЭВМ ЕС-1022 был проведен расчет функции полных потоков и скоростей течений оз. Севан. Поле плотности, использованное в расчетах, строилось вручную, качественно согласуя изотермы с изобатами, по данным температурных наблюдений в августе 1961—1965 г.г. Поле ветра над озером взято типичное для летнего сезона.

Использование вдвое мелкого шага горизонтальной сетки по сравнению с [2, 3] позволило получить более детальную картину течений. На рис. 1 видны два независимых циклонических круговорота вод

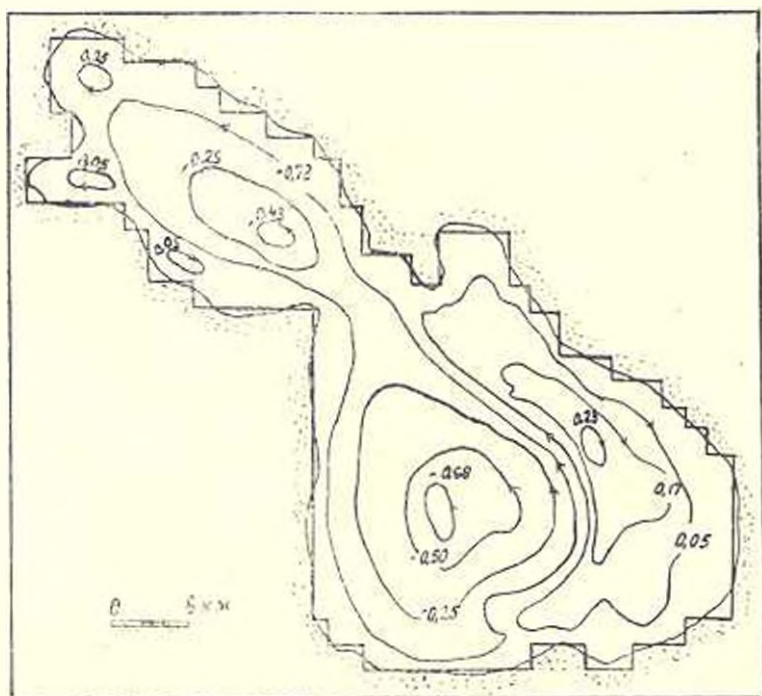


Рис. 1. Функция полных потоков $\psi(x, y)$ в 10^{10} см²/с.

Большого и Малого Севана. В Большом Севане средняя скорость циркуляции воды на поверхности достигает 8—9 см/с, на горизонте 10 м скорость уменьшается до 4—6 см/с, а в придонных слоях — менее 1 см/с. Воды Малого Севана охвачены циклоническим круговоротом со скоростью течений на поверхности 5—6 см/с, с глубиной скорость быстро уменьшается, достигая 1—2 см/с, на горизонте 10 м. В Большом Севане преобладает градиентная составляющая скорости, а в Малом — дрейфовая.

На рис. 2 видно интенсивное струйное течение из Большого Севана в Малый со средней поверхностной скоростью 12—14 см/с.

Обмен водой между двумя частями озера происходит вдоль берега пролива. Скорость течения воды в срединной части пролива мала, почти не меняется с глубиной и, в среднем, равна 1—2 см/с. Интегральный перенос воды через пролив составляет около $1,7 \cdot 10^9$ см³/с.

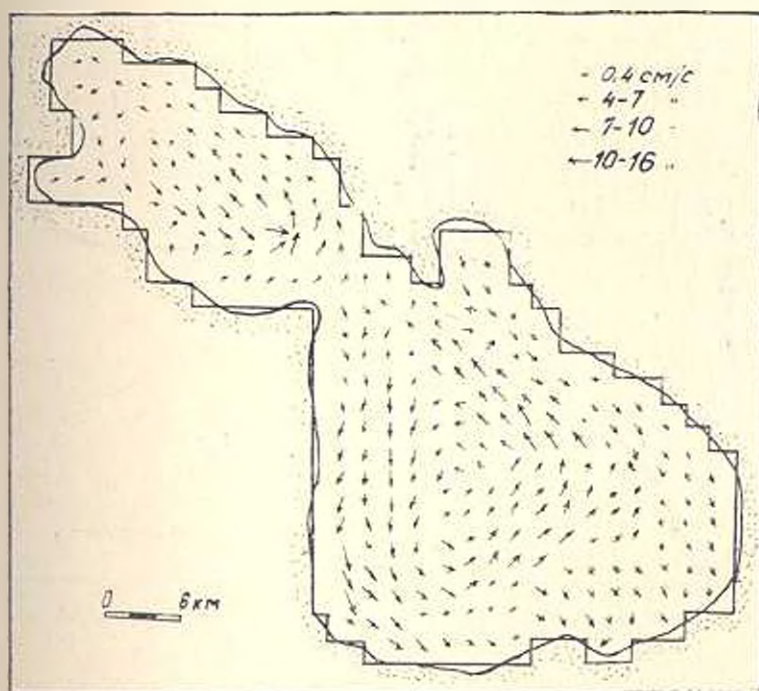


Рис. 2. Рассчитанные течения на поверхности.

В восточной части Большого Севана наблюдается антициклонический круговорот воды, занимающий довольно большую поверхность, со средней скоростью 1—2 см/с., что, по-видимому, обусловлено упором интенсивного струйного течения в Артанкешский залив. Кроме того, наблюдаются несколько локальных антициклонов в западной и северо-западной частях Малого Севана, что определяется рельефом дна и береговыми очертаниями.

Общий характер течений в Малом Севане остается, как и на поверхности, циклоническим. В Большом Севане придонные слои охвачены антициклоническим круговоротом, что свидетельствует о преобладании градиентной составляющей скорости, поскольку в наших расчетах градиент плотности не меняет знака [4]. Вдоль западного берега Большого Севана на поверхности наблюдается интенсивное дрейфовое течение со скоростью 14—17 см/с.

Вдоль восточного берега Большого Севана на глубине 20 м наблюдается глубинное течение со скоростью 2—3 см/с., тогда как скорость

круговорота вод на этом горизонте равна 0—1 см/с. По всей вероятности, интенсификация глубинного течения является следствием антициклонического круговорота воды, охватывающего придонные слои всего Большого Севана. В районе пролива в Малом Севане наблюдается увеличение скорости циркуляции воды.

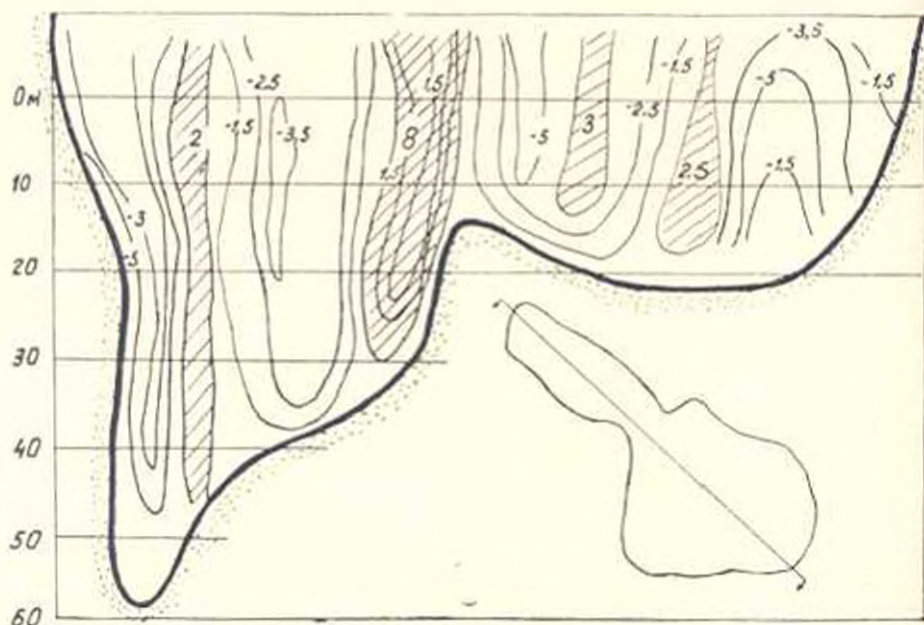


Рис. 3 Разрез вертикальной составляющей скорости $w(x, y, z)$ в 10^{-4} см/с. Зоны опускания заштрихованы

Вертикальная циркуляция в озере Севан характеризуется подъемом воды вдоль берегов со скоростями от 10^{-4} до $5 \cdot 10^{-4}$ см/с. В районе пролива наблюдается опускание воды со скоростью $8 \cdot 10^{-4}$ см/с. На рис. 3 видны интенсивные зоны подъема воды в районе больших глубин Малого Севана (до $5 \cdot 10^{-4}$ см/с.) и у юго-восточного берега (до $5 \cdot 10^{-4}$ см/с.). „Купол“ холодных вод Большого Севана, обусловленный подъемом глубинных вод, смещен к западному берегу. Обновление воды за счет подъема глубинных вод в юго-восточной части Большого Севана происходит примерно за 10—15 суток, в остальных частях — за 30—40 суток. В Малом Севане время обновления воды оказалось более 100 суток из-за малой скорости подъема глубинных вод.

Մ. Ա. ՀԱՊՈՐՅԱՆ, Գ. Մ. ԲՈՐՅՈՒՄՅԱՆ

ՈՆԿԱՆԱԼ ԼՃԻ ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԻ ԳԱՇՏԻ ՀԱՇՎԱՐԿ
ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄԱԿԵԼԱՎՈՐՈՒՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Հոդվածում կատարված է Մեանա լճի լճիկ փոնկքիայի և խոտերների արագությունների հաշվարկը գծային դիաֆուզիայի մոդելով դիտարկումներից հայտնի ջրի խտաժայան և լճի մակերևույթին զոյություն ունեցող բաժնու դաշտերով: Արդյունքները ներկայացված են բարոսկների տեսքով:

Մեծ և փոքր Մեանի ջրերը բնոյրկված են երկու տնկախ ցիկլոնիկ ջրապոտությունով: Մեծ Մեանում ջրերը բնոյրկված են երկու տնկախ ցիկլոնիկ ջրապոտությունով: Մեծ Մեանում դերակշռում են դրադիենտ հոսանքները, իսկ փոքր Մեանում՝ դրեյֆային:

Л И Т Е Р А Т У Р А

- 1 Саркисян А. С. Численный анализ и прогноз морских течений. Л., Гидрометеоздат, 1977.
- 2 Саркисян А. С., Торгомян Г. М. Расчет уронеиной поверхности и функции полных потоков для озера Севан. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXVII, № 6, 1974, с. 23—28.
- 3 Торгомян Г. М. Течения озера Севан. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXIII, № 3, 1975, с. 45—50.
- 4 Комаров В. Н. Теория и методы расчета океанических течений. М., «Наука», 1978.

Յ. Ա. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Դ. Դ. ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ

НЕКОТОРЫЕ КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ДВУХ КОНЕЧНЫХ ЦИЛИНДРОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматриваются две осесимметричные задачи теории упругости для двух цилиндров, контактирующих между собой торцами. Решения задач представляются в виде рядов Фурье-Дини. Для определения коэффициентов этих рядов получены парные ряды-уравнения, содержащие функции Бесселя, которые сводятся к квази-полне регулярной бесконечной системе, свободный член которой стремится к нулю. Окончательные выражения для контактных напряжений получены с выделенной особенностью. Для конкретной внешней нагрузки и некоторых значений отношения длин цилиндров и радиуса вычислены размеры контакта и напряжения на контактных поверхностях [1, 2].

1. Пусть два цилиндра конечной длины одинакового диаметра, изготовленных из различных материалов, прижимаются торцами друг к другу (рис. 1). На других торцах цилиндров приложена осесимметричная сжимающая нагрузка таким образом, что образуется кольцевая

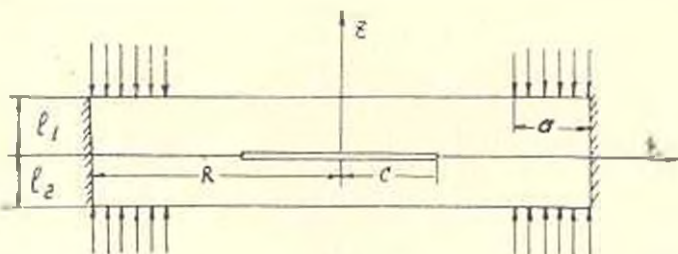


Рис. 1.

контактная область, наружный диаметр которой совпадает с диаметром цилиндров. Сцепление на поверхности контакта отсутствует. На боковой поверхности цилиндров нормальные перемещения и касательные напряжения равны нулю. Все величины, относящиеся к верхнему цилиндру, отметим индексом 1, а к нижнему — 2.

Граничные условия и условия контакта рассматриваемой задачи имеют вид:

$$\sigma_{zz}(r, l_i) = f^{(i)}(r) = a_0^{(i)} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k^{(i)} J_0(\beta_k r); \quad (1.1)$$

$$\tau_{rz}^{(i)}(r, l_i) = \tau_{rz}^{(i)}(R, z) = u_r^{(i)}(R, z) = 0, \quad (i = 1, 2); \quad (1.2)$$

$$\tau_{rz}^{(1)}(r, 0) = \tau_{rz}^{(2)}(r, 0); \quad \tau_{rz}^{(1)}(r, 0) = -\tau_{rz}^{(2)}(r, 0) = 0; \quad (1.3)$$

$$\begin{cases} u_z^{(1)}(r, 0) = -u_z^{(2)}(r, 0), \quad c < r < R; \\ \sigma_z^{(1)}(r, 0) = 0, \quad 0 < r < c, \end{cases} \quad (1.4)$$

где l_i , R — длины и радиус цилиндров; $J_n(x)$ — функция Бесселя действительного аргумента первого рода; β_k — корни уравнения $J_1(\beta_k R) = 0$.

Решение задачи сводится к нахождению функций Лива $\Phi^{(i)}(r, z)$, которые удовлетворяют бигармоническому уравнению [3]

$$\Delta^2 \Phi^{(i)}(r, z) = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Phi^{(i)}(r, z) = 0 \quad (1.5)$$

и условиям (1.1–1.4).

Напряжения и перемещения выражаются через функцию $\Phi^{(i)}(r, z)$ следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_i \Delta \Phi^{(i)} - \frac{\partial^2 \Phi^{(i)}}{\partial r^2} \right); \quad \tau_{rz}^{(i)} = \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 - \nu_i) \Delta \Phi^{(i)} - \frac{\partial^2 \Phi^{(i)}}{\partial z^2} \right]; \\ \sigma_z^{(i)} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_i \Delta \Phi^{(i)} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi^{(i)}}{\partial r} \right); \quad u_r^{(i)} = \frac{1}{2G_i} \left[2(1 - \nu_i) \Delta \Phi^{(i)} - \frac{\partial^2 \Phi^{(i)}}{\partial z^2} \right]; \\ \sigma_z^{(i)} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \nu_i) \Delta \Phi^{(i)} - \frac{\partial^2 \Phi^{(i)}}{\partial z^2} \right]; \quad u_z^{(i)} = -\frac{1}{2G_i} \frac{\partial^2 \Phi^{(i)}}{\partial r \partial z}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где G_i — модули сдвига, а ν_i — коэффициенты Пуассона.

Решения уравнений (1.5) ищем в следующем виде [4]:

$$\begin{aligned} \Phi^{(i)}(r, z) &= z(B_i z^2 + C_i z) + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k^{(i)} \operatorname{sh} \beta_k z + B_k^{(i)} \operatorname{ch} \beta_k z + \\ &+ C_k^{(i)} \beta_k z \operatorname{sh} \beta_k z + D_k^{(i)} \beta_k z \operatorname{ch} \beta_k z) J_0(\beta_k r). \end{aligned} \quad (1.7)$$

Удовлетворяя при помощи (1.6) условиям (1.1–1.3), после введения обозначений

$$(1 - \nu_1) C_k^{(1)} + G(1 - \nu_2) C_k^{(2)} = \frac{X_k}{\beta_k^2} \quad (1.8)$$

определим коэффициенты $A_k^{(i)}$, $B_k^{(i)}$, $C_k^{(i)}$, $D_k^{(i)}$, B_i , выраженные через³ неизвестную X_k и известную величину $a_k^{(i)}$. Удовлетворяя условиям (1.4), получим систему парных рядов-уравнений, содержащих функцию Бесселя:

$$\begin{cases} a_k^{(1)} + \tau \sum_{k=1}^{\infty} (1 - M_k) \beta_k X_k J_0(\beta_k r) = \sum_{k=1}^{\infty} N_k J_0(\beta_k r), \quad 0 < r < c; \\ q_0 + \sum_{k=1}^{\infty} X_k J_0(\beta_k r) = 0, \quad c < r < R, \end{cases} \quad (1.9)$$

где

$$\Delta_k M_k = - \{ (1 - \nu_1) Q_k^{(2)} [\operatorname{sh} \mu_{k1} (\operatorname{ch} \mu_{k1} - \operatorname{sh} \mu_{k1}) + \mu_{k1} (1 + \mu_{k1})] + \\ + G(1 - \nu_2) Q_k^{(2)} [\operatorname{sh} \mu_{k2} (\operatorname{ch} \mu_{k2} - \operatorname{sh} \mu_{k2}) + \mu_{k2} (1 + \mu_{k2})] \};$$

$$a_0 = a_0^{(1)} = - \frac{(R^2 - a^2)}{R^2}; \quad G = \frac{G_1}{G_2}; \quad \mu_{ki} = \beta_k l_i;$$

$$\Delta_k N_k = (1 - \nu_1) F_k^{(1)} Q_k^{(2)} a_k^{(1)} + G(1 - \nu_2) F_k^{(2)} Q_k^{(1)} a_k^{(2)} = - \frac{1}{1 - \nu_1 + G(1 - \nu_2)}; \quad (1.10)$$

$$q_0 = (1 - 2\nu_1) C_1 + G(1 - 2\nu_2) C_2; \quad \Delta_s = - \{ (1 - \nu_1) H_s^{(1)} Q_s^{(2)} + G(1 - \nu_2) H_s^{(2)} Q_s^{(1)} \};$$

$$F_k^{(1)} = \operatorname{sh} \mu_{k1} + \mu_{k1} \operatorname{ch} \mu_{k1}; \quad Q_k^{(1)} = \operatorname{sh}^2 \mu_{k1} - \mu_{k1}^2; \quad H_k^{(1)} = \operatorname{sh} \mu_{k1} \operatorname{ch} \mu_{k1} + \mu_{k1}.$$

Применяя методы решения парных рядов-уравнений [2, 5, 6], (1.9) приводим к бесконечной системе алгебраических уравнений

$$b_s = \sum_{n=1}^{\infty} a_{sn} b_n + d_s \quad (s = 0, 1, 2, \dots), \quad (1.11)$$

где

$$a_{sn} = \frac{2(4s+3)(-1)^{n-s}}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{K_1(y) I_{2n+3/2} \left(\frac{cy}{R} \right) I_{2s+3/2} \left(\frac{cy}{R} \right)}{y I_1(y)} dy + \\ + \frac{2(4s+3)}{R^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{M_k J_{2n+3/2}(\beta_k c) J_{2s+3/2}(\beta_k c)}{\beta_k^2 J_0^2(\beta_k R)}; \quad (1.12)$$

$$d_s = \frac{2(4s+3)c^2}{\pi R^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{N_k J_{2s+3/2}(\beta_k c)}{\beta_k^2} - \frac{2(1-2\nu_1)a_0^{(1)}}{R^2 \gamma \pi} \delta_{s0};$$

$$\gamma_0 = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \beta_0;$$

$$X_k = \frac{1}{(\beta_k c)^{3/2} J_0^2(\beta_k R)} \sum_{n=0}^{\infty} b_n J_{2n+3/2}(\beta_k c) \quad (k = 0, 1, 2, \dots);$$

δ_{mn} — символ Кронекера; $I_k(x)$, $K_k(x)$ — функция Бесселя от мнимого аргумента, соответственно, первого и второго рода.

Бесконечная система (1.11) квази-полнос регулярна [2, 6].

Подставляя значение X_k по формуле (1.12) в первое уравнение (1.9), для контактного напряжения получим следующее выражение:

$$\sigma_z(r, 0) = a_0^{(1)} - \gamma \sum_{k=1}^{\infty} M_k \beta_k N_k J_0(\beta_k r) - \sum_{k=1}^{\infty} N_k J_0(\beta_k r) +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\gamma V \bar{R}}{2c^{3/2}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n b_n \left[\frac{2}{\pi} \int_0^{\bar{r}} \frac{1 - \bar{y} K_1(y) I_{2n+3,2} \left(\frac{cy}{R} \right) I_0 \left(\frac{ry}{R} \right)}{I_1(y)} dy + \right. \\
& + \frac{V \sqrt{2} \left(\frac{c}{R} \right)^{2n+3/2} \Gamma^2(n+3/2)}{\pi \left(\frac{r}{R} \right)^{2n+3} \Gamma(2n+5/2)} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right)^{-1/2} \times \\
& \times F \left(n+1, n+1, 2n+\frac{5}{2}, \frac{c^2}{r^2} \right), \quad c < r < R. \quad (1.13)
\end{aligned}$$

Коэффициент особенности $\left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right)^{-1/2}$ в формуле (1.13) при $r = c$ имеет вид

$$K = \frac{1}{c^2 R \sqrt{2\pi}} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} b_k. \quad (1.14)$$

При полном контакте ($c = 0$) и отсутствии особенности напряжений на краю контакта, зависимости между длиной цилиндров от свойств материалов и размеров площади приложения внешней равномерно-распределенной нагрузки выражается следующей формулой:

$$a_0 - \sum_{k=1}^{\infty} N_k = 0. \quad (1.15)$$

В этом случае для контактного напряжения получаем

$$\sigma_z(r, 0) = a_0 - \sum_{k=1}^{\infty} N_k J_0(\xi_k r). \quad (1.16)$$

2. Рассмотрим аналогичную задачу, когда нормальные перемещения на торце нижнего цилиндра равны нулю.

Граничные условия задачи имеют вид:

$$z_r^{(n)}(r, l_1) = a_0 - \sum_{k=1}^{\infty} a_k J_0(\xi_k r); \quad (2.1)$$

$$z_{rz}^{(n)}(r, l_1) = z_{rz}^{(n)}(R, z) = u_r^{(n)}(r, l_2) = u_r^{(n)}(R, z) = 0. \quad (2.2)$$

Условия контакта представляются в виде (1.3–1.4), напряжения и перемещения — (1.6), а функции Лява — (1.7). Представляя выражение X_i в виде (1.12), аналогичным образом получаем для определения коэффициентов b_n квази-вполне регулярную систему бесконечных уравнений типа (1.11), где

$$\begin{aligned}
\Delta_k M_k &= (1 - \nu_1) H_k^{(2)} [\operatorname{sh} \mu_{k1} (\operatorname{ch} \mu_{k1} - \operatorname{sh} \mu_{k1}) + \mu_{k1} (1 + \mu_{k1})] - G (1 - \nu_2) Q_k^{(1)} \times \\
&\times [\operatorname{sh} \mu_{k2} (\operatorname{ch} \mu_{k2} - \operatorname{sh} \mu_{k2}) - \mu_{k2}], \quad \Delta_k N_k = - (1 - \nu_1) P_k^{(1)} H_k^{(2)} a_k, \quad (2.3)
\end{aligned}$$

$$\Delta_k = (1 - \nu_1) H_k^{(1)} H_k^{(2)} + G (1 - \nu_2) Q_k^{(1)} \operatorname{sh} \mu_{k2}.$$

ров для значений: $a = 0,99R$; $\nu_1 = 0,1$, $\nu_2 = 0,4$; $\nu_1 = 0,4$; $\nu_2 = 0,1$; $G = 0,05, 0,5, 1, 2, 20$ показан на рис. 2.

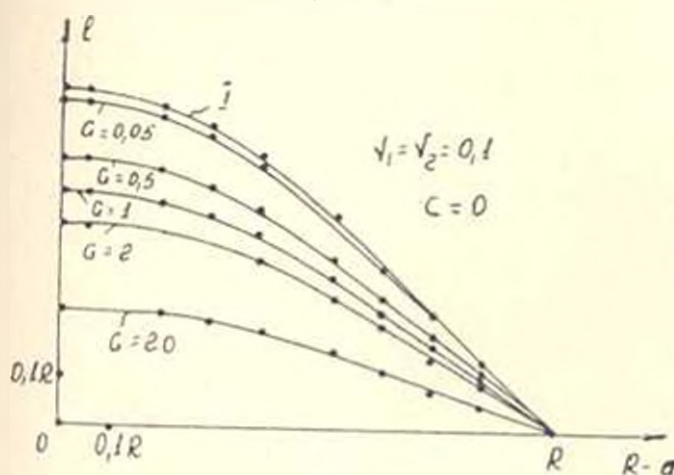


Рис. 3.

При полном контакте ($c=0$) и отсутствии особенностей напряжения на краю контакта, зависимость длины цилиндров l от размера участка приложения нагрузки $(R-a)$ для значений $a = 0,99R$; $\nu_1 = \nu_2 = 0,1$; $G = 0,05, 0,5, 1, 2, 20$ приведена на рис. 3.

При контакте по всему торцу ($c=0$) предельное значение длины цилиндров при различных значениях размеров приложения нагрузки $(R-a)$, коэффициента Пуассона и модулей упругости материалов цилиндров приведены в табл. 1. Значения нормального контактного на-

Таблица 1

Предельные значения l/R

G	$\frac{R-a}{R}$				
		$\nu_1 = 0,1$ $\nu_2 = 0,4$	$\nu_1 = 0,1$ $\nu_2 = 0,1$	$\nu_1 = 0,4$ $\nu_2 = 0,1$	
0	0,01	0,675	0,675	0,675	
	0,4	0,5437	0,5437	0,5437	
	0,75	0,2375	0,2375	0,2375	
0,05	0,01	0,6494	0,6557	0,64	
	0,4	0,5241	0,5295	0,5172	
	0,75	0,2259	0,2281	0,223	
0,5	0,01	0,5293	0,5635	0,4918	
	0,4	0,4326	0,4599	0,4037	
	0,75	0,1871	0,1992	0,1744	
1	0,01	0,465	0,5029	0,4279	
	0,4	0,3627	0,4123	0,3525	
	0,75	0,165	0,1781	0,1517	
2	0,01	0,4025	0,4385	0,3695	
	0,4	0,3118	0,3611	0,3102	
	0,75	0,1425	0,1557	0,1312	
20	0,01	0,2142	0,2586	0,2117	
	0,4	0,1937	0,2139	0,1752	
	0,75	0,0828	0,0903	0,075	

пряжения для различных значений l при $a=0,99R$, $G=0,5$, $\nu_1=0,1$, $\nu_2=0,4$ и $\alpha = \frac{R-c}{8R}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения напряжений $10^{-1} \frac{\sigma_2}{\rho}$

$\frac{R-c}{R} \alpha$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$c=2$	12	20	30	40	54	69	80	149	257
$c=2,5$	33	47	62	79	100	126	153	246	458
$c=3$	66	85	105	128	157	195	243	369	700
$c=4$	116	138	162	195	226	277	353	519	998
$c=5$	182	205	230	262	304	367	447	687	1332
$c=6$	258	277	301	333	380	454	598	849	1653
$c=7$	323	336	357	388	436	519	680	969	1889
R	319	359	378	408	457	542	720	1014	1975

Ершм. К. Марук

Поступило 17.V.1979

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Абрамян Б. Я., Макарян В. С. Осесимметричная задача о контакте между двумя слоями из различных материалов с учетом трения между слоями. «Известия АН АрмССР. Механика», т. XXIX, № 5, 1976.
2. Мартиросян З. А. О двух контактных задачах для круглых упругих цилиндров конечной длины. «Известия АН АрмССР. Механика», т. XXXI, № 5, 1978.
3. Тимошенко С. П. Теория упругости. М., ОНТИ, 1937.
4. Абрамян Б. Я. К задаче осесимметричной деформации круглого цилиндра. «Доклады АН АрмССР», т. XIX, № 1, 1954.
5. Cooke I. C., Tranter C. I. Dual Fourier-Bessel Series. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1959, v. VII, part 2, Oxford.
6. Баболян А. А., Мелконян А. Н. О двух смешанных осесимметричных задачах при упругости. «Известия АН АрмССР. Механика», т. XXII, № 5, 1969.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

О. М. БУНИАТЯН, К. И. БАБАЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОПНЕВМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Оперативный контроль параметров технологического процесса обогащения руд цветных металлов требует применение чувствительных и надежных измерительных приборов и устройств, отсутствие которых затрудняет создание и внедрение качественных автоматических систем управления процессами. В статье приводится исследование гидропневмоэлектрического преобразователя, разработанного Кафанским отделением ВЦ АН АрмССР и внедренного в 1978 г. на Зангезурском медно-молибденовом комбинате [1].

В основе его работы лежат известные принципы работы колокольного датчика пьезометрического уровнемера и чашечного манометра [2]. В нем впервые использованы совместно работы указанных двух принципов, что дает качественно новые результаты.

Функциональная схема исследуемого гидропневмоэлектрического преобразователя приведена на рис. 1. Давление в колоколе 2, функ-

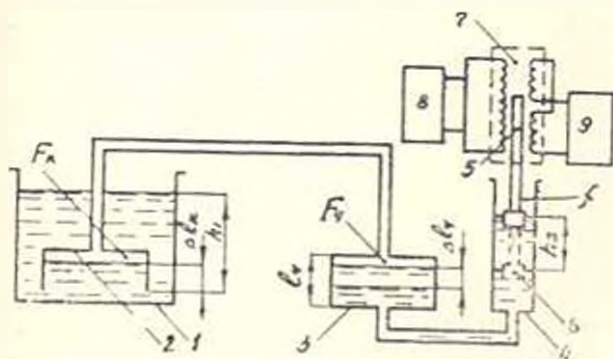


Рис. 1

ционально связанное с плотностью жидкости γ , в рабочей емкости 1 и входной величиной h_1 , по трубкам передается в чашу 3. Под его воздействием в трубке датчика 4 уровень жидкости с плотностью γ изменяется на величину h_2 . Линейное смещение уровня жидкости h_2 через сердечник 5 поплавок 6 в дифференциальном трансформаторе 7 преобразуется в электрическое напряжение, которое регистрируется в измерительном узле 9.

Образованное под воздействием величин h_1 , γ и произведения $h_1 \gamma$ в колоколе 2 избыточное давление определяется уравнением [2]

$$P_{\text{изб}} = (h_1 - \Delta l_c) \gamma_1. \quad (1)$$

Уравновешенное состояние гидродневматической системы характеризуется уравнениями

$$P_{\text{изб}} = (h_1 - \Delta l_c) \gamma_1 = (h_2 + \Delta l_c) \gamma_2, \quad (2)$$

$$F_4 \cdot \Delta l_c = f \cdot h_2, \quad (3)$$

$$F_k \cdot \Delta l_c = f \cdot h_2 + F_k \cdot \Delta l_c, \quad (4)$$

где f , F_k — площади поперечных сечений трубки 4 и чаши 3; $F_k \cdot \Delta l_c$ — объем сжатого газа, приведенный по площади поперечного сечения колокола 2 F_k .

Согласно закону Бойля—Мариотта:

$$\Delta l_c = l_k \frac{P_{\text{изб}}}{P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}}}, \quad (5)$$

где l_k — приведенная длина колокола 2 с учетом

$$l_k \cdot F_k = V_1, \quad (6)$$

V_1 — начальный общий объем воздуха в колоколе 2 и чаше 3. Из уравнений (1) — (5) получим:

$$h_2 = \frac{h_{1e}}{\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \left(1 + \frac{f}{F_4} \right) + \frac{f}{F_k} + l_k \frac{\left(1 + \frac{f}{F_4} \right) \gamma_2}{P_{\text{атм}} + h_2 \left(1 + \frac{f}{F_4} \right) \gamma_2}}, \quad (7)$$

откуда следует:

1. При $\gamma_1 = \text{const}$ и $\gamma_2 = \text{const}$ преобразователь может функционировать как измеритель уровня h_1 .

2. При $h_1 = \text{const}$ и $\gamma_2 = \text{const}$ преобразователь функционирует как измеритель плотности жидкости γ_1 .

3. При произвольно изменяющихся h_1 и γ_1 , преобразователь работает как манометр, который можно с успехом использовать в качестве датчика на целевых расходомерах с учетом изменяемой плотности нульпы [3].

Режим уровнемера. Коэффициент передачи определяется из (7)

$$K_h = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \left(1 + \frac{f}{F_4} \right) + \frac{f}{F_k} + l_k \frac{\left(1 + \frac{f}{F_4} \right) \gamma_2}{P_{\text{атм}} + h_2 \left(1 + \frac{f}{F_4} \right) \gamma_2}}, \quad (8)$$

откуда видна нелинейная зависимость h_2 от h_1 . Оценку нелинейности можно произвести по выражению

$$\delta_h = \frac{\Delta K_h}{K_h} = \frac{|K_{h_1} - K_{h_{\max}}|}{K_{h_1}} \quad (9)$$

где K_{h_1} , $K_{h_{\max}}$ — значения K_h при $h_2 = 0$ и $h_2 = h_{2\max}$. После некоторых преобразований окончательно получим:

$$\Delta K_h = \left| \frac{1}{A + B \left(1 + B \frac{1}{1,1 a_k} \right)} - \frac{1}{A + B} \right| \quad (10)$$

$$\delta_h = \frac{(1 + a_1) \gamma_2}{P_{\text{атм}} + \frac{1}{1,1 h_{2\max}} \left(\frac{a_1}{a_k} + \frac{1}{1 + a_1} \right)} \quad (11)$$

где

$$a_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}; \quad a_1 = \frac{f}{F_1}; \quad a_k = \frac{f}{F_k}; \quad A = a_1 (1 + a_1) + a_k;$$

$$B = \frac{1,1 h_{2\max} \cdot a_k (1 + a_1) \cdot \gamma_2}{P_{\text{атм}}}$$

Из (8) и (11) следует, что $0 < K_h < 1$ при $a_1 = 1$ и между относительной ошибкой δ_h и коэффициентом K_{h_1} существует убывающая связь, что свидетельствует о достаточной точности (коэффициент δ_h стремится к нулю) измерения уровня при близких к единице значениях коэффициента передачи K_h .

Режим плотномера. Аналогичными рассуждениями получим следующие выражения характеристик: коэффициент передачи —

$$K_T = \frac{h_2}{\gamma_1} = \frac{h_1}{\gamma_2 \left(1 + \frac{f}{F_1} \right)} - h_2 \left(\frac{1}{P_{\text{атм}} + h_2 \gamma_2 \left(1 + \frac{f}{F_1} \right)} + \frac{f}{F_k \cdot \gamma_2 \left(1 + \frac{f}{F_1} \right)} \right); \quad (12)$$

оценка нелинейности —

$$\delta_T = \left| \frac{h_{2\max} a_k}{h_1} \left(\frac{1,1 h_{2\max} (1 + a_1) \gamma_2}{P_{\text{атм}}} + 1 \right) \right|. \quad (13)$$

Из уравнений (12) и (13) следует, что в предельном случае, когда a_k и a_1 стремятся к нулю, при $a_1 = 1$ коэффициент передачи K_T стремится к величине h_1 , т. е. диапазон вариации K_T равен $0 \div h_1$. Когда значение K_T близко к h_1 , плотномер обеспечивает большую точность ($\delta_T \rightarrow 0$) линейности h_2 от γ_1 .

Режим манометра. Коэффициент передачи имеет вид:

$$K_p = \frac{h_2}{P_{\text{изб}}} = \frac{1}{\gamma_2 \left(1 + \frac{f}{F_1} \right)}. \quad (14)$$

который констатирует линейную связь между выходом h_2 и входом $P_{\text{плб}}$. В режиме манометра преобразователь обеспечивает одинаково высокую точность для любого значения коэффициента передачи K_p .

Выводы

1. Совместное функционирование колокольного датчика пьезометрического уровнемера и чашечного манометра позволяет использовать поплавковые датчики (в данном случае дифтрансформаторный) для измерения уровня и плотности агрессивных жидкостей, а также давления агрессивных газов.

2. Гидропневматический узел дает возможность измерения выше указанных параметров в широких пределах, с высокой точностью и чувствительностью (в долях миллиметра).

3. Гидропневмоэлектрический преобразователь может с успехом служить в системах АСУ технологических процессов обогащения руд цветных металлов в качестве датчика уровня, плотности, давления и расхода твердого в пульве.

Кафанский отд. ВЦ
АН АрмССР

Поступило 10.IV.1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Бунятян О. М., Бабалян К. С. Разработка и внедрение электрического преобразователя выходного сигнала экспресс-гравиметра-плотнмера на Зангезурском медно-молибденовом комбинате. «Промышленность Армении», 1970, № 10.
2. Емельянов А. Н., Емельянов В. А., Калинина С. А. Практические расчеты в радиотехнике. М., «Машиностроение», 1967.
3. Троицкая Е. Е., Козин В. З., Аршинский В. М. Автоматизация обогащательных фабрик. М., «Недра», 1970.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Э. М. ДИЛАНЯН, В. С. ВАРՇԵՏՅԱՆ, А. П. ТАРАСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Низкие энергетические и мощностные показатели современных химических источников тока, приемлемых в качестве источника питания автономных электромеханических систем (АЭМС), как, например, электроподвижных установок (ЭПУ) — электромобилей, шахтных аккумуляторных электровозов, электропоездов и др., выдвигают необходимость исследования и разработки оптимальных по выбранным критериям систем управления, приводящих к повышению эффективности использования энергооборудования.

Несмотря на традиционное применение двигателей последовательного возбуждения (ДПВ) в качестве тяговых двигателей ЭПУ, для установок с двигателями постоянного тока независимого возбуждения (ДПВ), кроме относительно легко реализуемых режимов рекуперативного торможения привода и тяги с ослаблением магнитного потока появляется дополнительная возможность оптимального управления режимами работы автономной системы, поскольку посредством тока якоря и магнитного потока электродвигателя задаются две степени свободы.

Характерными особенностями АЭМС с аккумуляторным питанием являются наличие существенного взаимовлияния характеристик и показателей аккумуляторной батареи (АБ), широтно-импульсного преобразователя (ШИП), приводного двигателя (Д), механического редуктора (Р) и изменение выходных показателей системы в зависимости от зарядового состояния АБ [1].

Исходя из специфики АЭМС с аккумуляторным питанием, АБ представляет из себя источник с ограниченным и изменяющимся энергоресурсом, мощность которого соизмерима с мощностью нагрузки, и отдача на энергию и емкость свинцовых АБ существенно зависит от разрядного тока, рассматриваются следующие критерии оптимальности: минимум тока АБ — I_{AB} ; минимум абсолютных суммарных потерь мощности в системе — $P_{\Sigma} = P_{AB} + P_{ШИП} + P_{Д} + P_{Р}$, где P_{AB} , $P_{ШИП}$, $P_{Д}$ и $P_{Р}$ — абсолютные потери мощности, соответственно, в АБ, ШИП, Д и Р; максимум полезной энергии АБ или максимум совершаемой системой работы, что для неизменных статических режимов определяется как [1]

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cdot \left(\frac{I_0}{I_{AB}} \right)^{\alpha} - P_0 \cdot t_0 \cdot \left(\frac{I_0}{I_{AB}} \right)^{\alpha+1}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}$ — энергия полного разряда АБ базисным током I ; t_1 — время допустимого разряда АБ в режиме $I = \text{const}$; a , n — постоянные для данной АБ коэффициенты ($0 < a < 1$); $P_0 = P_c = P_{AB}$.

Задача формулируется так: найти управление автономной системой АБ ШИП Д-Р, обеспечивающей заданный режим движения, при всех трех критериях оптимальности. Управлениями являются ток якоря, магнитный поток электродвигателя и передаточное число редуктора. При исследовании системы с ДНВ предполагается, что управление магнитным потоком двигателя осуществляется путем регулирования тока возбуждения с помощью индивидуального ШИП. В случае ДПВ ШИП отсутствует, а последовательно соединенные обмотки якоря и возбуждения двигателя управляются одним ШИП.

Для системы с ДНВ средние за период импульсного цикла ШИП значения тока I_{AB} и потерь мощности АБ P_{AB} определяются в зависимости от соотношения скважностей преобразователей якорной цепи γ_u и цепи возбуждения γ_a :

$$1. \text{ При } \gamma_u \geq \gamma_a - I_{AB} = I_a \cdot \gamma_u + I_a \gamma_a; P_{AB} = R_{AB} \gamma_u (I_a - I_a)^2 + R_{AB} (\gamma_u - \gamma_a) \cdot P_a; \\ \gamma_u = \frac{U_a + I_a R_{AB} \gamma_a}{E_{AB} - I_a \cdot R_{AB}}; \gamma_a = \frac{U_a}{E_{AB} - (I_a + I_a) \cdot R_{AB}}; \quad (2)$$

$$2. \text{ При } \gamma_u < \gamma_a - I_{AB} = I_a \gamma_u + I_a \gamma_a; P_{AB} = R_{AB} \gamma_u (I_a - I_a)^2 + R_{AB} (\gamma_u - \gamma_a) \cdot P_a; \\ \gamma_u = \frac{U_a}{E_{AB} - (I_a + I_a) \cdot R_{AB}}; \gamma_a = \frac{U_a + I_a R_{AB} \gamma_u}{E_{AB} - I_a \cdot R_{AB}}; \quad (3)$$

где U_a , I_a , U_a , I_a — средние за период импульсного цикла ШИП значения напряжения и тока якоря и обмотки ДНВ; E_{AB} и R_{AB} — э. д. с. и внутреннее сопротивление АБ в рассматриваемом ее зарядовом состоянии.

Относительно выбранных критериев оптимальности необходимо отметить совпадение экстремальных управлений при реализации данной статической точки управлением магнитного потока двигателя. Для выбранных критериев условия существования частных экстремумов при управлении потоком двигателя с учетом (1), имеют следующий вид:

$$\frac{\partial I_{AB}}{\partial \Phi} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \Phi} = \frac{\partial (E_{AB} I_{AB} - K_1 M_p n_p)}{\partial \Phi} = \frac{\partial (P_a + R_{AB} \cdot I_{AB}^2)}{\partial \Phi} = E_{AB} \cdot \frac{\partial I_{AB}}{\partial \Phi} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \Phi} = B_0 \frac{\partial I_{AB}}{\partial \Phi} + B_1 \cdot \frac{\partial P_i}{\partial \Phi} = 0, \quad (6)$$

где $B_0 = -\mathcal{E}_{AB} \cdot \frac{I_{AB}}{I_{AB}^2} \cdot \left(\frac{I_a}{I_{AB}} \right)^{b-1} + P_0 t_1 (a+1) \cdot \frac{I_a}{I_{AB}^2} \cdot \left(\frac{I_a}{I_{AB}} \right)^a - 2 R_{AB} \cdot I_{AB} \times \\ \times t_1 \cdot \left(\frac{I_a}{I_{AB}} \right)^{a-1}; B_1 = -I_a \cdot \left(\frac{I_a}{I_{AB}} \right)^{a-1}; M_p, n_p$ — крутящий момент и частота вращения на выходе редуктора; K_1 — коэффициент размерности. Таким образом из (4), (5) и (6) имеем:

$$\frac{\partial I_{AB}}{\partial \Phi} - \frac{\partial P_1}{\partial \Phi} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \Phi} = 0, \quad (7)$$

При аналитическом исследовании закона статического управления АЭМС с ДНВ, если пренебречь влиянием тока обмотки ДНВ, с учетом (2) условие (4) приводится к виду:

$$\frac{\partial I_{AB}}{\partial \Phi} = \frac{(E_{AB} - R_{AB} \cdot I_a) \cdot \frac{\partial U_a I_a}{\partial \Phi} + R_{AB} U_a I_a \cdot \frac{\partial I_a}{\partial \Phi}}{(E_{AB} - R_{AB} \cdot I_a)^2} = 0,$$

откуда, после несложных упрощений, получается:

$$k_0 \cdot \Phi^6 + k_1 \cdot \Phi^5 + k_2 \cdot \Phi^4 + k_3 \cdot \Phi^3 + k_4 \cdot \Phi^2 + k_5 \cdot \Phi + k_6 = 0, \quad (8)$$

где

$$k_0 = -R_{AB} \cdot b_1^2 \cdot b_2; \quad k_1 = 2E_{AB} b_1 b_2; \quad k_2 = \Delta U_{\text{нп}} \cdot E_{AB} b_1 + R_{AB} R \cdot b_1^2 b_2 - 2R_{AB} b_0 b_1 b_2;$$

$$k_3 = -R_{AB} \cdot b_0^2 \cdot b_2 + 2R_{AB} R a_2 b_1 - \Delta U_{\text{нп}} E_{AB} \cdot b_0; \quad k_4 = -2E_{AB} R \cdot b_1^2;$$

$$k_5 = R_{AB} \cdot R \cdot b_1;$$

$$b_1 = \frac{M_p}{\eta_p j c_e} = \frac{0,975 (a_2 n_p j - a_1)}{c_e}; \quad b_1 = \frac{0,975}{c_e} (a_2 n_p j - a_1); \quad b_2 = c_e n_p j + R a_2 b_1;$$

a_0, a_1, a_2, a_3 — коэффициенты аппроксимации полных потерь холостого хода двигателя; $R, \Delta U_{\text{нп}}$ — сопротивление якорной цепи и падение напряжения на щетках двигателя; η_p — к.п.д. редуктора в данном статическом режиме движения, c_e — коэффициент э.д.с. двигателя.

Уравнение (8) в случае вышеуказанного допущения и фиксированного значения передаточного числа редуктора позволяет определять оптимальные значения потока двигателя для формирования заданного статического режима по выбранным критериям оптимизации. Далее решение поставленной задачи производится на ЦВМ с учетом математической модели системы, описанной в [2].

Алгоритм расчета оптимального закона управления АЭМС с ДНВ методом градиента с переменным шагом поиска по магнитному потоку Д приведен на рис. 1. Входными величинами при расчете являются M_p, n_p и начально задаваемые значения передаточного числа редуктора f_{min} и тока возбуждения $I_{\text{вб}}$. Для организации поиска в алгоритм введены фиктивные переменные A, A_1, A_2 . Приведенный алгоритм был использован для статической оптимизации АЭМС на базе оборудования электромобиля ЭМ-ЕрIII-1 на ЦВМ ЕС-1022. По результатам расчета на рис. 2 приведены зависимости, показывающие повышение эффективности использования оборудования за счет статической оптимизации по сравнению с АЭМС с неуправляемым потоком двигателя. При этом для АЭМС с ДНВ с управляемым потоком для каждой статической точки рассчитывались соответствующие сочетания оптимальных управлений $I_{\text{вб опт}}, \Phi_{\text{опт}}, I_{\text{я опт}}$, приводящих к экстремуму выбранных критериев, а для АЭМС с ДНВ с неуправляемым потоком ($\Phi = \Phi_{\text{ном}} = \text{const}$) для тех же статических точек были рассчитаны

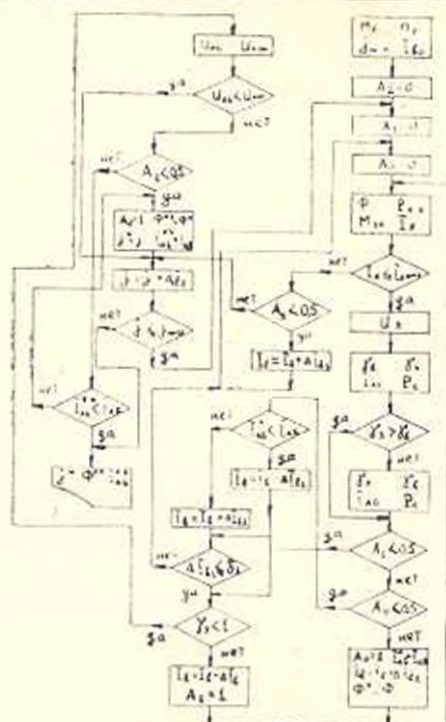
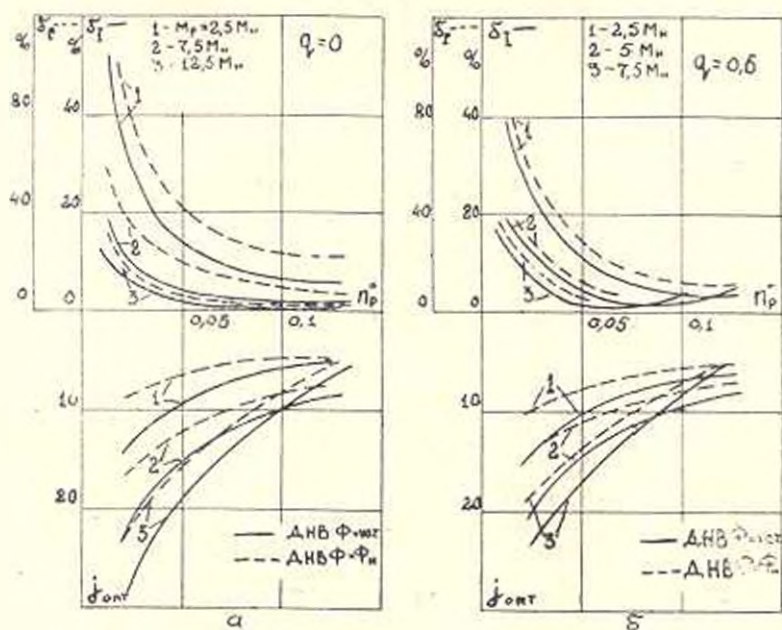


Рис. 1. Алгоритм статической оптимизации АЭМС с ДНВ.

Рис. 2. Сравнение энергетической эффективности АЭМС с ДНВ с управляемым (—) и неуправляемым (---) потоком двигателя и закона оптимального управления передаточного числа редуктора. а) $q = 0$;

$$б) q = 0,6; n^* = \frac{n_n}{n_{д.н.}}$$

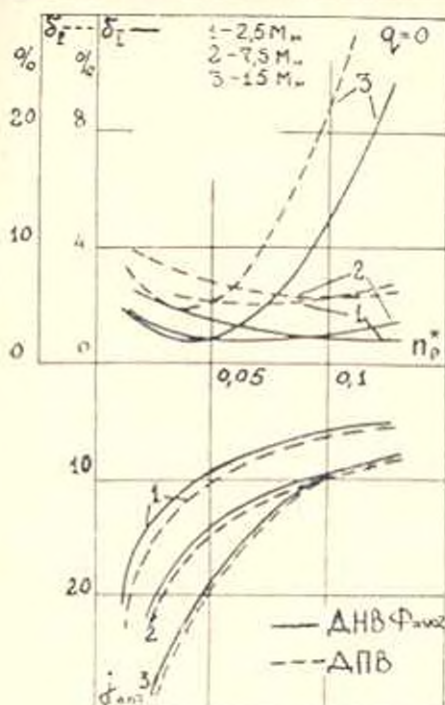


Рис. 3. Сравнение энергетической эффективности АЭМС с ДНВ с управляемым потоком и ДНВ по закону оптимального управления передаточного числа редуктора.

экстремумы выбранных критериев при собственных значениях управления $j_{\text{опт}}$. Оценка эффективности от оптимизации производилась с помощью коэффициентов

$$\delta_I = - \frac{I_{\text{AB}} - I_{\text{AB2}}}{I_{\text{AB1}}} \cdot 100\%, \quad \delta_P = - \frac{P_{\Sigma} - P_{\Sigma2}}{P_{\Sigma1}} \cdot 100\%$$

относительного уменьшения тока АБ и суммарных потерь системы, где I_{AB1} , $P_{\Sigma1}$, I_{AB2} , $P_{\Sigma2}$ — минимальные значения тока АБ и суммарные потери АЭМС с ДНВ с управляемым и неуправляемым потоками. На том же рисунке приведены зависимости оптимальных значений $j_{\text{опт}}$ для обоих типов ДНВ, при разных зарядовых состояниях АБ (зарядовое состояние АБ оценивается согласно [1] относительной величиной отдаваемой емкости q).

Сравнение АЭМС с ДНВ с управляемым потоком и АЭМС с ДПВ иллюстрировано на рис. 3. Из приведенных зависимостей следует наличие существенных преимуществ по энергетической эффективности АЭМС с ДНВ с управляемым потоком по сравнению с системами с ДПВ и ДНВ с неуправляемым потоком. Поскольку при практических реализациях АЭМС приходится применять редуктора с фиксированным или с ограниченным числом ступеней переключения, приведенные зависимости $j_{\text{опт}} = (M_1, n_p, q)$ могут быть использованы для обоснованного выбора передаточного числа редуктора.

Приведенные законы оптимального управления потоком двигателя с учетом влияния зарядного состояния АБ можно использовать при разработке оптимального регулятора управления током возбуждения двигателя рассматриваемой АЭМС.

В ы п о д ы

1. Статическую оптимизацию АЭМС целесообразно производить по критерию минимума потребляемого от источника питания тока.

2. При оптимальном управлении АЭМС с выбранным передаточным числом редуктора экстремальные управления по критериям минимума потребляемого от источника тока, минимума суммарных потерь и максимуму полезной отдачи источником питания энергии, совпадают.

3. Полученное выражение (8) при выбранном редукторе можно использовать для нахождения законов управления оптимальных регуляторов возбуждения двигателей АЭМС.

4. Эффективность использования электрооборудования АЭМС от применения статической оптимизации повышается по мере уменьшения скорости и нагрузки на входе редуктора. Предложенный алгоритм расчета и полученные результаты статической оптимизации могут быть использованы для выбора параметров оборудования, разработки и исследования АЭМС.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 23.1978

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Варпаган В. С. Исследование режимов работы и характеристик электрооборудования автономных электроприводных установок с аккумуляторным питанием. Автореферат канд. диссерт., Ленинград, 1977.
2. Дилаян Э. М. и др. Математическая модель системы «Аккумуляторная батарея—импульсный преобразователь—двигатель постоянного тока». «Известия АН АрмССР (серия Г. II)», т. XXXI, № 3, 1978.

Բ Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

ԷՆԻՄԵՏՈՎԱ

18.

1. Հ. Հաւանյան: Պարտաւարտութիւնը քանի՞ք է պարտաւարտութիւն դիպրոտ անդրեղ-
հատ մողիւր 3

ԷԼԵԿՏՐԱՏԵԿՆԻԿԱ

1. Հ. Կարախանյան: Անհամասն միջավայրի մագնիսական թափանցելիութեան ինտեգր-
տումը՝ հաշվի առնելով մասնիկների փոխազդեցութիւնը 7

ՀԱՇՎԱՎԱԿԱՆ ՏԵԽՆԻԿԱ

- Վ. Լ. Միւնայան: «Տիրիատոր» պաշտպանիչ ջղթա, ներմատիւմ-նէրում աւդի ունեցող
պրոցեսները թղթին մագնիսավորումը 13

ԶՈՓՈՂԱԿԱՆ ՏԵԽՆԻԿԱ

- Վ. Խ. Վարդանյան: Սղի նարվածային ալիքների հնչման գրանցման արագացում ունա-
կային նայանիշներ 21
- Վ. Հ. Վառուդի. Խ. Դ. Տրիֆոնով: Մետաղալարային նյութերի յարամագծի հետազոտութեան
շափիշ 25

ՀԻՊԵՐԱՎԱԿԱՆ

- Ա. Ա. Հախըրյան, Դ. Մ. Խորզովյան: Պետեւ յնի նոտաների դաշտի հաշվարկը մա-
թեմատիկական մողիսպոտման մէթոդով 31

ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՊԵՐ

- Զ. Ա. Սարսիբույան, Դ. Ե. Ներսիսյան: Տարբեր կյանքերից հրկու վարքագոր գլանների
նամար արդէ կոնսակտային խնդրներ 43
- Զ. Մ. Թաւիլայան, Կ. Վ. Թարայան: Հիպոպիսիւմիկապոպիսի փոխակերպիչի հետա-
գատումը 47
- Է. Մ. Դիլանյան, Վ. Խ. Վարդանյան, Ա. Գ. Տաւրայան: Արտաքին էլեկտրամագնիսական
կապի համակարգերի էներգիափոխան ցուցանիշները 51

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА

- И. А. Униция.* Дискретно-непрерывная модель оптимизации газотранспортных сетей Стр. 31

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Л. О. Караханян.* Исследование магнитной проницаемости неоднородной среды с учетом взаимного влияния частиц 7

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- В. Т. Микисян.* Цифровое моделирование переходных процессов в подсистемах «Тиристор—защитная цепь» 13

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- В. Р. Варданян.* Быстродействующие емкостные датчики для регистрации давления воздушных ударных волн 21
- В. О. Ванин, С. Д. Трифонов.* Фотоэлектрический измеритель диаметра проводочных материалов 28

ГИДРАВЛИКА

- М. А. Аюлян, Г. М. Торгомян.* Расчет поля скоростей озера Севан методом математического моделирования 34

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

- З. А. Мартиросян, Г. Г. Нерсисян.* Некоторые контактные задачи для двух конических цилиндров из различных материалов 41
- О. М. Букишян, К. В. Бабян.* Исследование гидродинамическо-электрического преобразователя 41
- Э. М. Диланян, В. С. Варпетян, А. П. Тирасян.* Исследование энергетических показателей автономных электромеханических систем 51

Технический редактор Л. А. АЗИЗБЕКЯН

ВФ 03209. Подписано к печати 24.1.80 г. Тираж 445. Изд. 5207. Заказ 163

Формат бумаги 70×108¹/₁₆. Печ. л. 3,75. Бум. л. 1,87.

Усл. печ. л. 5,25. Уч. изд. листов 3,78.

Издательство Академии наук Армянской ССР, 375019, Ереван, Барекамутян, 24-г.
Типография Издательства АН Армянской ССР, Ереван, Барекамутян, 24.