

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 6 раз в год

Խ Ր Ր Ա Չ Ը Ն Կ Ա Ն Կ Ո Ւ Ե Չ Ի Ա

Ռ. Մ. Մառտիրոսյան (պատասխանատու խմբագիր), Վ. Վ. Ալեքսեևսկի,  
Ռ. Վ. Աբրյան, Ռ. Ա. Ղազարյան, Ս. Մ. Դավթարյան, Մ. Վ. Կասյան,  
Ս. Հ. Սանակյան, Յու. Լ. Սարգսյան, Մ. Գ. Սանակյան (պատ. խմբ. թիղ.),  
Ջ. Կ. Սեփանյան (պատասխանատու քարտուղար), Վ. Ս. Խաչատրյան:

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Р. М. Мартиросян (ответственный редактор), В. В. Алексеевский,  
Р. В. Атонн, Р. А. Казарян, С. М. Казарян, М. В. Касьян,  
А. О. Саамян, Ю. Л. Саркисян, М. Г. Стакин (зам. ответ редактора),  
Э. К. Степанян (ответственный секретарь), В. С. Хачатрян*

УДК 658.1.011.44:008

И. Р. ОВАКИМЯН

# ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ВЫБОРЕ ВАРИАНТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Для оценки числа возможных вариантов применялся ФСА как метод оптимизации проектирования на основе морфологического анализа. Дается алгоритм и блок-схема для выбора наилучшего варианта решения на стадии проектирования сложных технических систем. Изучаются различные варианты, отбираются конструкторские элементы и функционально-структурная схема объекта, составляется список признаков по заданным критериям и правилам предпочтения, выбираются списки для дальнейшего исследования. ФСА способствует развитию и совершенствованию технико-экономического анализа и включает все лучшее и передовое в теории и практике экономики, организации и управления процессами создания новой техники.

Ил. 1. Библиогр. 3 назв.

Ֆունկցիոնալ արժեքային վերլուծությունը զննատվում է որպես նախագծման լավագույն մեթոդ, որտեղ նախադր տարրերակների քանակությունը կատարվում է կազմարանական վերլուծության ղեկավարում: Տրվում է ալգորիթմը և բյուկ-սխեման՝ նախագծման փուլում արժեքադրումների լավագույն տարրերակը ընտրելու համար: Ուսումնասիրվում են նախագծելիքների և տարրերի տարրեր տարրերակներ՝ իրենց ֆունկցիոնալ կառուցվածքային սխեմաներով, ընտրվում են համապատասխան լավանդիչները և նախապատվության օրենքով կազմվում է հետագա ուսումնասիրությունների ցանկը: Մեթոդը նախադրություն է ստեղծում տեխնիկատեխնական վերլուծության զարգացմանը և կատարելագործմանը, նրա տեխնական և գործնական տվյալների լավագույնի և առաջավորի կիրառումը նոր տեխնիկայի ստեղծման, կազմակերպման և ղեկավարման մեջ:

Первостепенное значение в научно-техническом прогрессе имеет правильный выбор методов проектирования специальных технологических машин (СТО) и аппаратов, особенно при внедрении ГАП. Эти методы должны отражать основные направления научных исследований по разработке новой техники, технико-экономические и социальные показатели эффективности и прогнозируемые объемы НИР и ОКР, организация производства, общий необходимый уровень научной и производственной базы.

В интенсификации производства и повышении научно-технического прогресса важное значение имеет функционально-стоимостный анализ (ФСА)—метод комплексного технико-экономического исследования и совершенствования функций, конструкций объекта и его составных частей, оптимизации проектно-конструкторских работ по созданию новой техники и технологии, повышение эффективности производства, улучшения качества изделий и их функций, снижения их себестоимости.

Вопросы ФСА, и в частности применение морфологического анализа исследованы на примере разработки специального технологического оборудования-автомата раскалибровки (АР) токопроводящих элементов, комплексных автоматизированных роторных систем (КАРС-214). Включение в состав САПР технико-экономических расчетов дает возможность использовать ФСА в процессе конструкторского и технологического проектирования. Совместное использование ФСА и САПР дает большой экономический эффект [1].

Целью настоящей работы является составление алгоритмов выбора оптимального варианта проектно-конструкторских решений при помощи функционально-стоимостного анализа, где используется метод оптимизации проектирования на основе морфологического анализа (МА) [2].

При разработке проектов сложных объектов (СТО) или КАРС), особенно в ранней стадии их проектирования, когда число возможных вариантов велико, часто трудно обосновать решение о направлении работ. Полную технико-экономическую оценку вариантов и выбор наиболее оптимального из них целесообразно проводить с помощью алгоритма блок-схемы (рис.):

1. Определение задач проектируемого объекта.

2. Выделение его основных частей со своим функциональным назначением.

3. Проведение технико-экономического анализа параметров объекта с учетом возможных вариантов по определенным количествам независимых переменных. Дальнейшая оценка АР проводится путем экспертной оценки (в баллах) важности каждого из параметров по некоторым числам функции  $f_i$  в зависимости от целей их назначения. При этом используется метод Дельфи или метод расстановки приоритетов для снижения вероятности ошибок при численной оценке значимости или относительной важности функций [3].

4. Установление числа возможных вариантов изделия на базе морфологической матрицы по формуле

$$N_m^n = \prod_{i=1}^n C_i, \quad (1)$$

где  $N_m^n$  — возможные варианты решения проблемы.

5. При формировании и отборе вариантов применяются различные методы, в том числе альтернативные стохастические модели. Задачи разработки формулируются с анализом существующих методов проектирования сложных объектов. На ранних этапах проектирования из множества допустимых вариантов на основе МА выбирается ограниченное число рациональных вариантов. Из них в дальнейшем отбирается оптимальный вариант проекта с прогрессивной технологией, формами и методами управления, дающими запланированные результаты с минимальными затратами, живого и овеществленного труда при соблюдении государственных, социально-эколо-

гических, эргономических и эстетических нормативов. При ФСА выделяют оптимальный вариант реализации главной функции объекта, изучают различные варианты, их конструкторские элементы и функционально-структурные схемы объекта, список признаков по заданным критериям и правилам предпочтения для дальнейшего исследования. Это можно представить в виде морфологической матрицы  $T() = f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ .

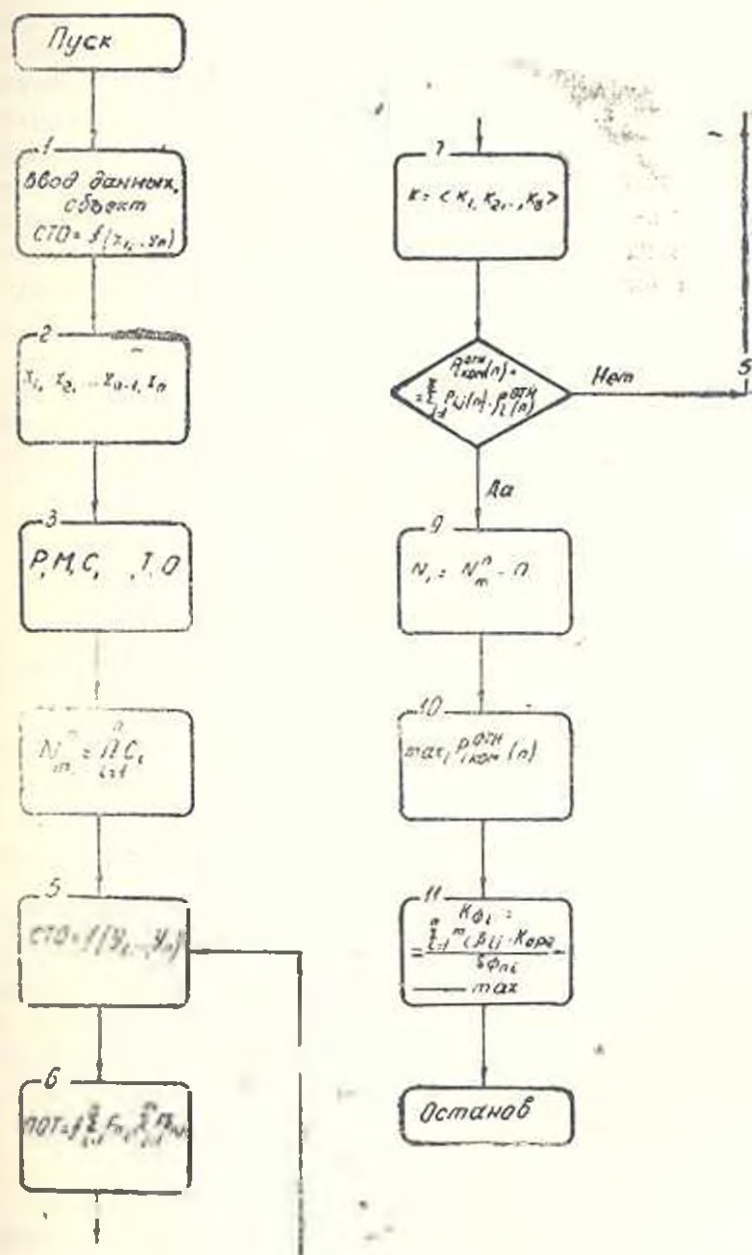


Рис. Схема алгоритма выбора оптимального варианта решения

6. Возможные варианты конструктивно-технологического исполнения оцениваются путем составления «положительно-отрицательной» таблицы (ПОТ)

$$\text{ПОТ} = f \left( \sum_{i=1}^n F_{\text{пол}}, \sum_{j=1}^m F_{\text{бесп}} \right),$$

где  $F_{\text{пол}}$  и  $F_{\text{бесп}}$  — полезные и бесполезные функции,  $i = 1, 2, \dots, n$  и  $j = 1, \dots, m$  — число полезных и бесполезных функций.

7. Варианты проекта анализируются по выбору критериев  $K = (K_1, \dots, K_n)$ ;  $K = (K_1, \dots, K_n)$ . Каждый вариант исходного множества критериев имеет  $n$ -мерный вектор оценок. При многокритериальной модели анализ ПОТ вариантов носит систематизированный и формальный характер. Перечень критериев, их количественная и качественная оценки в зависимости от содержания задачи определяется экспертами—специалистами. При достаточно полном составе новых критериев их оценка не влияет на результат. Суть каждого критерия должна быть понятной и однозначной. Интервал между оценками по каждой шкале должен быть небольшим, чтобы не затруднять оценку вариантов проекта ( $0 \leq \beta \leq 1$  или  $1 \leq \beta \leq 10$ ).

8. Производится синтетическая (комплексная) оценка вариантов по выдвинутым критериям: для каждого уровня проекта определяется набор критериев оценки качества элементов и вариантов проекта. Их оценка зависит от элементов уровней [3]

$$P_{i \text{ макс}}^{\text{отн}}(n) = \sum_{j=1}^z P_{ij}^{\text{отн}}(n), \quad P_i^{\text{отн}}(n) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $P_{ij}^{\text{отн}}(n)$  — относительный приоритет  $i$ -го объекта над  $j$ -ым,  $P_j^{\text{отн}}(n)$ ,  $i = 1, \dots, z$  — весовые коэффициенты критериев компонентов вектора  $K$ .

Любые два элемента одного уровня с одинаковой оценкой критерия влияют на оценку всего варианта. Если выбран критерий на каком-то уровне, то весь вариант оценивается по этому критерию и элементу. Для критериев, встречающихся на двух и более уровнях, строятся таблицы оценки сочетания оценок.

9. Выделяются подмножества рациональных вариантов, из которых в исходном множестве нет ни одного предпочтительного. При выборе предпочтительного варианта используется информация по критериям их относительной важности и наибольшего сходства друг с другом. Часто рациональные предпочтительные варианты определяются после выделения подмножества наиболее предпочтительных вариантов. Эта процедура выделения является итеративной

$$N_i^* = N_n^* - \Pi, \quad (3)$$

где  $N_n^*$  — возможные варианты решения проблемы;  $\Pi$  — противоречивые варианты;  $N_i^*$  — множество осуществимых вариантов решения проблемы.



10. Определяются и исключаются противоречивые и заведомо неэффективные варианты, трудно выполнимые в силу условий производства или других факторов. Применяются лишь оставшиеся конкурентоспособные варианты. При небольшом числе вариантов их эффективность определяется методом «Паттерн», а при их большом числе и значительном влиянии ограничивающих условий проводится экономико-математическое моделирование либо решение выполняется методом попарного сравнения и расстановки приоритетов:  $\max x_i P_{i, \text{крит}}^{\text{проект}}(n)$ .

11. Строится отношение предпочтения с использованием информации по упорядочению оценок каждого критерия по предпочтению. Предпочтительный вариант соответствует требуемому варианту. В других случаях используется дополнительная информация о важности отдельных критериев и оценок по ним. Эти сведения необходимы для упорядочения критериев и оценок по ним и представляются в виде

$$K_{\Phi} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \lambda_{ij} K_{\text{крит}}}{S_{\text{фн}}}, \quad (4)$$

где  $m_i$  — коэффициент весомости критерия, определяемый экспертным методом с условием  $\sum_{i=1}^n m_i = 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $\lambda_{ij}$  — степень удовле-

творения  $j$ -го варианта  $i$ -му критерию, которая определяется методом оценок по баллам, объединения их в одинаковые группы для перехода от порядковых шкал критериев к интегральным и к шкалам отношений;  $K_{\text{крит}}$  — коэффициент функциональной организованности объекта;  $S_{\text{фн}}$  — функционально-необходимые затраты.

Описанную методику выбора рациональных вариантов проекта сложных систем целесообразно применять на ранних этапах проектирования, что сокращает время и стоимость проектирования, улучшает качество и позволяет выбрать оптимальный вариант проекта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Половинкин А. И. и др. Функционально-физический метод поиска оптимального проектирования: Уч. пос. — Иваново: Изд-во Ивановского ун-та — 1983. — 83 с.
2. Одрин В. М., Картавов С. С. Морфологический анализ систем. — Киев: КДНП, 1977. — 146 с.
3. Блюмберг В. А., Глуцкий В. Ф. Какое решение лучше? Метод расстановки приоритетов. — Л.: Ленивдат, 1983. — 159 с.

УДК 624.072

Р. С. МИНАСЯН, С. А. ДАВЕЯН

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ УСИЛИЙ В ПОПЕРЕЧНОЙ ДИАФРАГМЕ КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ, ИМЕЮЩЕЙ ДВЕРНЫЕ ИЛИ ОКОННЫЕ ПРОЕМЫ

Предлагается достаточно точный метод определения расчетных усилий в поперечных несущих стенах крупнопанельных зданий, который основан на идее сведения поперечной стены к отдельным самостоятельным многостолбовым диафрагмам. Совместная работа отдельных столбов обеспечивается при помощи нормальных и сдвигающих связей. В расчетах учитывается и влияние податливости грунтового основания поперечной стены.

Ил. 2. Библиогр.: 4 назв.

Առաջարկվում է խոշորանիստ շենքերի լայնական կողմ պատերի հաշվարկային ուժերի որոշման բաժանարար բնութիւնը ունեցող եղանակ, որը հիմնված է լայնական պատերը բազմասյուն, ինքնուրույն պատերի վերածման զաղափարի վրա: Սյուների համառոտ աշխատանքը ապահովվում է բաշխված ներքու և արտին կապերի միջոցով: Հաշվարկի ժամանակ հաշվի է առնվում նաև լայնական պատի հիմքի քառակուսի ընկերակիւթիւնը համակարգիչով:

Предлагается метод определения расчетных усилий для поперечной несущей диафрагмы крупнопанельного здания, который основан на идее сведения поперечной стены с проемами к отдельным самостоятельным правильным многостолбовым диафрагмам (рис. 1). Неразрывность элементов обеспечивается совместной работой столбов диафрагмы и их связей-перемычек. Для составления расчетной модели в перемичках на одной вертикали проводится разрез, в результате чего образуются отдельные элементы-столбы. Взаимное влияние этих столбов имитируется при помощи внутренних сил, возникающих в местах разреза (рис. 2). В расчетной схеме неизвестными усилиями являются нормальные и сдвигающие усилия в нормальных и сдвигающих связях.

В рассмотренной задаче точность решения значительно больше по сравнению с имеющимися [1, 2, 4], т. к. кроме сдвигающих связей, учитываются еще нормальные связи и податливость грунтового основания. При этом отыскание неизвестных усилий сравнительно усложняется, т. к. кроме сдвигающих т. появляются еще и неизвестные нормальные усилия  $R$ .

В расчетной схеме внешними нагрузками являются: горизонтальной—интенсивность давления  $q$ , а вертикальной—собственный вес  $p$ . Согласно расчетной схеме, изгибающие моменты в сечениях первого и второго элементов будут

$$M_1(x) = \int_0^x \int_0^{\eta} |R(\tau) - q(\tau)| d\tau d\tau + z_1 \int_0^{\eta} z(\tau) d\tau + M_1^0, \quad (1)$$

$$M_2(x) = - \int_0^x \int_0^{\eta} R(\tau) d\tau d\tau + z_2 \int_0^{\eta} z(\tau) d\tau + M_2^0.$$

Здесь  $M_1^0$  и  $M_2^0$  — моменты в сечениях, возникающие от поворота фундаментов и определяемые при помощи зависимостей

$$M_1^0 = C_1 \alpha_1 \quad \text{и} \quad M_2^0 = C_2 \alpha_2, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — углы поворота фундаментов вследствие податливости основания,  $C_1$  — коэффициент жесткости основания,  $R(x)$  и  $z(x)$  — нормальные и сдвигающие связи соответственно в нормальных и сдвигающих связях.

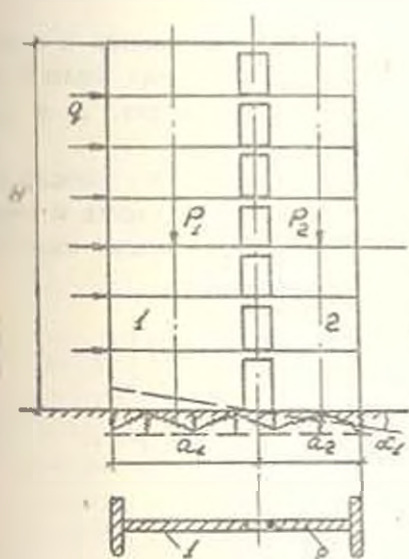


Рис. 1.

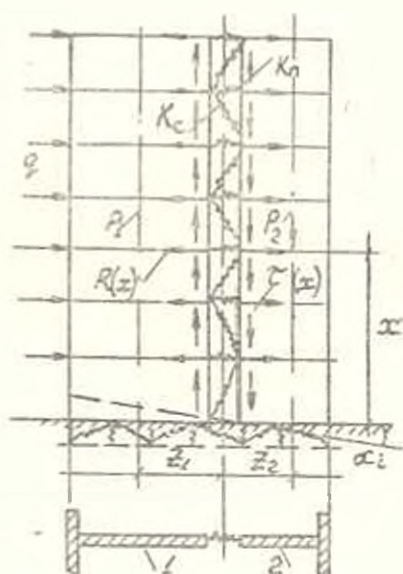


Рис. 2.

Принимая линейную зависимость между напряжениями и деформациями в нормальных  $v(x)$  и сдвигающих  $u(x)$  связях, получаем

$$R(x) = K_n |v_1(x) - v_2(x)|, \quad z(x) = K_s [u_1(x) - u_2(x)], \quad (3)$$

где  $K_n$  и  $K_s$  — соответственно коэффициенты жесткости нормальных и сдвигающих связей,  $v_1(x)$  и  $u_1(x)$  — прогибы и продольные деформации столбов, которые определяются согласно расчетной схеме (рис. 1) при помощи выражений

$$v_1(x) = \frac{1}{D_1} \left[ \int_0^x \int_0^{\eta} |M(\tau) - M_1(\tau) + z_1 T(\tau) + C_1| d\tau d\tau \right], \quad (3)$$



$$v_2(x) = \frac{1}{D_2} \left\{ \int_0^x \int_x^H [z_2 T(x) - \mathfrak{M}(x) + Cz_2] dx dx \right\}, \quad (4)$$

$$u_1(x) = \int_x^H \left[ \left( \frac{1}{B_1} + \frac{z_1^2}{D_1} \right) T(x) + \frac{z_1}{D_1} \mathfrak{M}(x) + C \frac{z_1 z_1}{D_1} - \right. \\ \left. - \frac{p_1(H-x)}{B_1} - \frac{M(x)}{D_1} z_1 \right] dx, \quad (5)$$

$$u_2(x) = \int_x^H \left[ \frac{z_2}{D_2} \mathfrak{M}(x) - \left( \frac{1}{B_2} + \frac{z_2^2}{D_2} \right) T(x) - C \frac{z_2 z_2}{D_2} - \right. \\ \left. - \frac{p_2(H-x)}{B_2} \right] dx.$$

где  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $D_1$  и  $D_2$  — соответственно жесткости при сжатии и изгибе первого и второго столбов,  $T(x)$  и  $\mathfrak{M}(x)$  — сдвигающие силы и изгибающие моменты в сдвигающих и нормальных связях,  $p_1$  и  $p_2$  — погонные продольные силы от собственного веса.

Используя выражения (3), значения (4), (5) и зависимости  $\mathfrak{M}''(x) = R(x)$ ,  $T'(x) = \tau(x)$ , решение задачи можно свести к решению двух дифференциальных уравнений, где неизвестными являются  $\mathfrak{M}(x)$  и  $T(x)$

$$\mathfrak{M}^{IV}(x) + 4v^4 m(x) = - \left[ \frac{M(x)}{D_1} + \beta T(x) + \Delta_1(x) \right] K_0, \quad (6)$$

$$T''(x) - \alpha^2 T(x) = \left[ \beta(x) \mathfrak{M} - \frac{M(x)}{D_1} z_1 + \Delta_2(x) \right] K_1, \quad (7)$$

где

$$4v^4 = K_0 \gamma, \quad \gamma = \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}, \quad \beta = \frac{z_1}{D_1} - \frac{z_2}{D_2},$$

$$\alpha^2 = \frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} + \frac{z_1^2}{D_1} + \frac{z_2^2}{D_2}, \quad \Delta_1(x) = C \left( \frac{z_1}{D_1} - \frac{z_2}{D_2} \right),$$

$$\Delta_2(x) = C \left( \frac{z_1 z_1}{D_1} + \frac{z_2 z_2}{D_2} \right).$$

Установлено, что сдвигающие усилия мало влияют на величины нормальных усилий, поэтому ими в уравнении (6) можно пренебречь. Из дифференциального уравнения (6) легко определяем значение изгибающих моментов и нормальных связей  $m(x)$ , принимая при этом следующие граничные условия:

$$\mathfrak{M}(H) = 0, \quad \mathfrak{M}'(H) = 0, \quad \mathfrak{M}''(H) = 0, \quad \mathfrak{M}(0) = 0. \quad (8)$$

Решая дифференциальные уравнения (6) и учитывая, что члены, содержащие коэффициенты  $e^{-\gamma H}$ , мало влияют на распределение усилий (ограничившись точностью 2...3%), получаем

$$\mathfrak{M}(x) = -\frac{qH}{\gamma D_1} \left[ \frac{e^{-\gamma x}}{\gamma} \frac{\sin \gamma(H-x)}{\sin \gamma H + \cos \gamma H} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{H}\right)^2 \right] + \frac{\Delta_1(x)}{\gamma} \left[ \frac{e^{\gamma(H-x)} (\sin \gamma x + \cos \gamma x)}{\sin \gamma H + \cos \gamma H} - 1 \right] \quad (9)$$

В дальнейшем, подставляя значение  $\mathfrak{M}(x)$  в дифференциальное уравнение (7), интегрируя и используя граничные условия  $T'(0)=0$  и  $T(H)=0$ , находим выражения для  $T(x)$ .

$$T(x) = \frac{q\beta K_c}{4x^3 \gamma D_1} \left[ \frac{xH}{\left(1 + \frac{4\gamma^2}{x^2}\right) (\sin \gamma H + \cos \gamma H)} \left\{ \left(1 - \frac{2x^2}{x^2}\right) \sin \gamma H + \left(1 + \frac{2\gamma^2}{x^2}\right) \cos \gamma H \right\} \frac{\operatorname{sh} \alpha(H-x)}{\operatorname{ch} \alpha H} + \left(\frac{2\gamma}{x}\right) e^{-\gamma H} \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{ch} \alpha H} - \left(\frac{2}{\gamma}\right) e^{-\gamma x} \left\{ \sin \gamma(H-x) + \frac{2\gamma^2}{x^2} \cos \gamma(H-x) \right\} \right] - \left[ xH \frac{\sin \alpha(H-x)}{\cos \alpha H} - \left(1 - x, \frac{\gamma}{\beta}\right) \frac{x^2}{2} (H-x)^2 \right] - \frac{\Delta_2(x)}{x^2} \left(1 - \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{ch} \alpha H}\right) K_c. \quad (10)$$

Полученные формулы (9), (10) в зависимости  $\mathfrak{M}'(x) = Q(x)$ ,  $Q'(x) = -R(x)$ ,  $T'(x) = z(x)$  позволяют легко определить все расчетные величины в нормальных и сдвигающих связях для поперечной диафрагмы, имеющей несимметрично размещенные оконные или дверные проемы.

В формулах (9) и (10) последние члены, содержащие углы поворота столбов, возникающие от податливости основания поперечной диафрагмы, определяются при помощи выражений

$$\operatorname{tg} \alpha_i = -\frac{1-\nu_0}{\pi E_0} \int_{-1}^{+1} \frac{\bar{R}(\xi)}{\xi} d\xi + \frac{(1-\nu_0)(1-2\nu_0)}{E_0} \bar{q}(\xi) \Big|_{\xi=0}, \quad (11)$$

где  $\xi = \frac{z}{a}$  — безразмерная координата,  $\nu_0$  и  $E_0$  — соответственно коэффициенты Пуассона и модуль деформации грунта,  $\bar{R}(\xi)$  и  $\bar{q}(\xi)$  — реактивные давления на подошве основания и определяемые формулами [3]

$$\bar{R}(\xi) = C_1 \xi + \frac{C_2}{2} (5\xi^3 - 3\xi), \quad (12)$$

$$\bar{q}(\xi) = D_0 + \frac{D_2}{2} (3\xi^2 - 1) + \frac{D_4}{8} (35\xi^4 - 30\xi^2 + 3),$$

где

$$C_1 = \frac{(1,50 + 0,20\beta) K}{5 + \beta} q, \quad C_2 = \frac{(3,50 + 0,60\beta) K}{5 + \beta} q, \quad D_0 = q.$$

$$D_1 = \frac{(56,50 + \beta) K}{41,80 + 1,20\beta + 0,13\beta^2} q, \quad D_2 = \frac{(1,25 + \beta) K}{41,80 + 1,20\beta + 0,03\beta^2} q.$$

$$\beta = \frac{\pi a}{2H}, \quad K = \frac{\pi(1 - \nu_0)}{4(1 - \nu_0)}, \quad a = a_1 + a_2.$$

$q$  — интенсивность горизонтального давления

Анализ данных расчетных величин показывает, что учет упругого поворота основания диафрагмы существенно меняет картину напряженного состояния наиболее нагруженной нижней части здания и в случае, когда  $\frac{F_0}{q} \geq 50$ , практически податливость грунтового основания не влияет на распределение расчетных величин и их можно не учитывать при проектировании крупнопанельного здания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гусельников В. М. Расчет вертикальных диафрагм с проемами крупнопанельных зданий повышенной этажности // Бетон и железобетон. — 1964. — № 10. — С. 96—115.
2. Дроздов П. Ф., Себикина Н. М. Проектирование крупнопанельных зданий. — М.: ЛИС, 1967. — 416 с.
3. Минасян Р. С. Рекомендации по расчету несущих стен крупнопанельных зданий. — Ереван, 1987. — 65 с.
4. Batas J., Szabo. Theoretical and Experimental Analysis of Bearing Walls Weakened by Rows of Holes. — Bratislava, 1965. — P. 87—106.

АрмСХИ

25 III. 1990

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 3, 1991, с. 106—112

#### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 534.832:725.055

Ю. А. ГАСПАРЯН, А. Г. МАНУЧАРЯН, Б. Ю. ГАСПАРЯН

#### РАСЧЕТ КОНЕЧНОГО ИМПЕДАНСА АКУСТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Рассматривается расчет импеданса и коэффициенты звукопоглощения (КЗП) акустического элемента звукопоглощающей конструкции, нагруженного локальным переменным сопротивлением. Определены величины резистанса и реактанса импеданса новых видов звукопоглощающих конструкций. Полученные выражения позволяют рассчитать импеданс и КЗП одно-двухсекционных звукопоглощающих конструкций при проектировании и изготовлении акустических строительных конструкций полной заводской готовности.

Табл. 1. Библиогр.: 4 изв.

Չիտարկվում է տեղական փոփոխական դիմադրությունը բեռնված ձայնակլանի: Կառուցվածքի ձայնադիտական տարրի իմպեդանսի և ձայնակլանման դործակցի հաշվարկը: Որոշված են նոր ձայնակլանի իմպեդանսի ակտիվ և ռեակտիվ բաղադրիչների մեծությունները: Ստացված արտահայտությունները նախադրություն են տալիս հաշվարկել մեկ և երկրորդ ձայնադիտական կառուցվածքների ձայնակլանման դործակցները չիտարարական կառուցվածքների վերջնական պատրաստի (դործարանային) արտադրանքի նախադրման և իրականացման համար:

В строительной акустике при решении задачи о колебаниях в области импедансными граничными условиями возможно рассмотрение метода возмущений при переменном импедансе акустического элемента звукопоглощающих конструкций. Коэффициент звукопоглощения (КЗП) при нормальном падении звуковой волны  $\theta = 0^\circ - \alpha_0(f)$  и для диффузного звукового поля  $\theta = 10...80^\circ$  могут быть вычислены по формулам

$$\alpha_n(f) = 4R \frac{|(R+1)^2 - \bar{Y}^2|}{|R+1|^2 + |\bar{Y}|^2}, \quad R = R(f)(\rho c S)^{-1}, \quad \bar{Y} = Y(f)(\rho c S)^{-1}, \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{диф}}(f) = 4R(f)(\rho c S) \cos \theta [R(f) \cos \theta + \rho c S]^2 + |Y(f) \cos \theta|^2.$$

Как видно из вышеуказанных значений, для определения КЗП необходимо рассчитать активные  $R(f)$  и реактивные  $Y(f)$  компоненты входного импеданса  $Z^*(f) = A_P/V$  акустического элемента звукопоглощающих конструкций, который характеризуется амплитудой силы  $A_P$  и скорости  $V$ , решая задачу о волновом процессе в многорезонансной колебательной системе (рис.), изложенной в [1]. Воспользовавшись электроакустической аналогией, имеем

$$Z_{\text{вх}}(f) = A_{11} + \frac{A_{12}(A_{23}A_{31} - A_{21}A_{33}) + A_{13}(A_{21}A_{32} - A_{22}A_{31})}{A_{22}A_{32} - A_{23}A_{32}}. \quad (2)$$

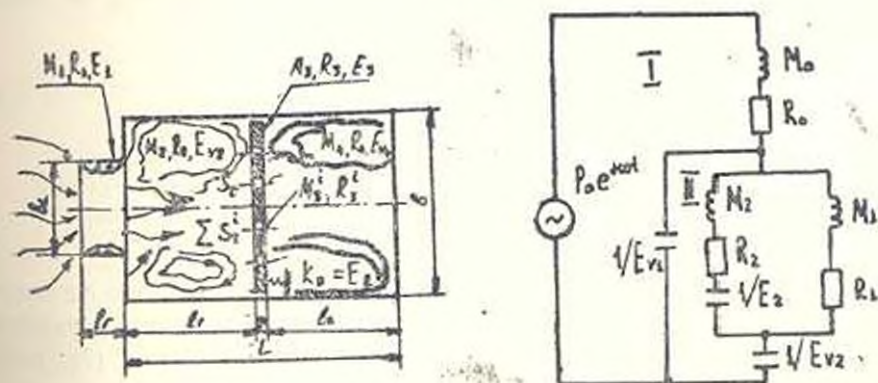


Рис. Схема и электроакустическая аналогия резонансного звукопоглотителя с внутренней податливой микроперфорированной панелью на упругих связях-пружинах.

Между акустическими и механическими параметрами системы существует следующая связь:



$$\begin{aligned} A_{11} &= Z_0 - j(\rho c/S) \operatorname{ctg} kl_1, & A_{12(33)} &= Z_{12} - j(\rho c/S) (\operatorname{ctg} kl_1 + \operatorname{ctg} kl_2), \\ A_{12(21)} &= -j(\rho c/S) \operatorname{cosec} kl_1, & A_{13(11)} &= -j(\rho c/S) \operatorname{cosec} kl_1, \\ A_{23(33)} &= -j(\rho c/S) (\operatorname{ctg} kl_1 + \operatorname{ctg} kl_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя значения (3) в выражение (2), после некоторых преобразований получим, что входной импеданс равен

$$\begin{aligned} Z_{\text{вх}}(f) &= Z_0 + \frac{\rho c}{S} \cdot \frac{\rho c/S + Z_1 \operatorname{ctg} kl_1}{(\rho c/S) \operatorname{ctg} kl_1 + jZ_1}, \\ Z_1 &= \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0}{Z_1 + Z_0}, \end{aligned} \quad (4)$$

здесь  $Z_1 = R_1 + j\omega M_1$ ,  $Z_2 = R_2 + j\omega M_2 - jE_2/\omega$ ,  $Z_0 = R_0 + j\omega M_0$ ,

$Z_0 = -j(\rho c/S) \operatorname{ctg} kl_2$  при  $kl_2 \ll 1$ ,  $k = \omega/c$ ,  $Z_0 = -j\rho c/\omega S l_2$ .

Причем при подстановке значений  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_0$  для  $Z_1$  получаем

$$Z_1 = \frac{(R_1 + j\omega M_1)(R_2 + j(\omega M_2 - E_2/\omega))}{R_1 + R_2 + j[\omega(M_1 + M_2) - E_2/\omega]} - j(\rho c/S) \operatorname{ctg} kl_2. \quad (5)$$

После преобразования имеем

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{(R_1 R_2 - \omega^2 M_1 M_2 - E_2 M_1) \omega + j[(R_2 M_2 + R_1 M_2) \omega - R_1 E_2]}{\omega(R_1 + R_2) + j[\omega^2(M_1 + M_2) - E_2]} - \\ &\quad - j \frac{\rho c^2}{\omega S l_2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Освобождаясь от комплексного знаменателя, умножим на сопряженную величину и получим

$$Z_1 = \frac{AC + BD + j(BC - AD)}{C^2 + D^2} - jE_0/\omega, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A &= R_1 R_2 - \omega^2 M_1 M_2 - E_2 M_1, & B &= \omega^2 (M_1 R_2 + R_1 M_2) - R_1 E_2, \\ C &= \omega (R_1 + R_2), & D &= \omega^2 (M_1 + M_2) - E_2. \end{aligned}$$

Полный входной локальный импеданс двухсекционного резонансного звукопоглотителя с внутренней податливой микроперфорированной панелью на упругих связях-пружинах, согласно (3) и (7), равен

$$\begin{aligned} Z_{\text{вх}}(f) &= Z_0 + \frac{(\rho c/S)^2 (Z_1 - Z_2) \operatorname{cosec}^2 kl_1}{Z_1 Z_2 - j(\rho c/S) (Z_1 - Z_2) (\operatorname{ctg} kl_1 + \operatorname{ctg} kl_2)} - \\ &\quad - j(\rho c/S) \operatorname{ctg} kl_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Освободившись от комплексного знаменателя, получим выражение для входного локального импеданса системы



$$Z_{\text{вх}}(f) = R_0 + j\omega M_0 + \left(\frac{\rho c}{S}\right)^2 \operatorname{cosec}^2 kl_1 \times \\ \times \frac{[R_1 + R_2 + j\omega(M_1 + M_2 - E_2/\omega)] |A_1 - jB_1|}{A_1^2 + B_1^2} - j \frac{\rho c}{S} \operatorname{ctg} kl_1, \quad (9)$$

где

$$A_1 = R_1 R_2 - \omega^2 M_1 M_2 + M_1 E_2 + (\rho c/S) (\operatorname{ctg} kl_1 + \\ + \operatorname{ctg} kl_2) (\omega M_1 + \omega M_2 - E_2/\omega^2),$$

$$B_1 = \omega (R_1 M_2 + R_2 M_1 - R_1 E_2/\omega^2) - (\rho c/S) (R_1 + R_2) (\operatorname{ctg} kl_1 + \operatorname{ctg} kl_2).$$

Из (9) активные  $R(f)$  и реактивные  $Y(f)$  компоненты входного импеданса равны

$$R(f) = R_0 + \left(\frac{\rho c}{S} \operatorname{cosec} kl_1\right)^2 \frac{A_1 (R_1 + R_2) + \omega B_1 (M_1 + M_2 - E_2/\omega^2)}{A_1^2 + B_1^2}, \quad (10)$$

$$Y(f) = \omega M_0 + \left(\frac{\rho c}{S} \operatorname{cosec} kl_1\right)^2 \times \\ \times \frac{\omega A_1 (M_1 + M_2 - E_2/\omega^2) - B_1 (R_1 + R_2)}{A_1^2 + B_1^2} - \frac{\rho c}{S} \operatorname{ctg} kl_1.$$

Присоединенные и взаимоприсоединенные массы  $M_{11(22)(33)}$  в формулах (4)–(10) с учетом активных компонент приобретают следующий вид:

$$M_{11(22)(33)} = M_{0,1,2,3} + 2 \frac{\rho}{S} \sum_{m+n \neq 0} \sum_{p} \frac{[I_{mn}^{(1)(2)}]^2}{k_p},$$

$$M_{0,1,2} = \frac{\bar{m}_{0,1,2} + \bar{r}_{0,1,2}^{(10)}}{S_{0,1,2}}, \quad M_3 = \bar{m}_3 / (S - S_2), \quad (11)$$

$$\bar{m}_0 = \rho S_0 (L_r + 2\delta_r), \quad \bar{m}_2 = \rho S (L + \delta_r), \quad \bar{m}_1 = \rho S_2 (\tau + 2\delta_c),$$

$$E_2 = E_0/S^2, \quad \bar{m}_3 = \rho \delta_c (S - S_2), \quad R_{0,1,2,\tau} = \bar{r}_{0,1,2,\tau} / S_{0,1,\tau}^2.$$

Величины  $I_{mn}^{(1)}$  вычисляются по формуле

$$I_{mn}^{(1)} = \frac{\bar{r}_{mn}^{(1)}}{S} \int_0^L \int_0^L \cos k_m x \cos k_n y dS; \quad (12)$$

$$I_{mn}^{(2)} = \frac{\bar{r}_{mn}^{(2)}}{S} \int_{(S-S_2)}^L \int_0^L \cos k_m x \cos k_n y dS.$$

Для квадратного отверстия ( $\rho_0 x a_0$ ) в горловине резонатора имеем

$$I_{mn}^{(1)} = \frac{\bar{r}_{mn}^{(1)}}{S} S_0 \left| \frac{\sin k_m a_0}{k_m a_0} \cdot \frac{\sin k_n a_0}{k_n a_0} \right|, \quad (13)$$

а для круглого отверстия и горловине резонатора радиусом  $r_0$

$$I_{ms}^{(0)} = \frac{z_m z_n}{S} \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \cos(k_m r \cos \varphi) \cos(k_n r \sin \varphi) r dr d\varphi =$$

$$= \frac{z_m z_n}{S} S_0 \frac{2J_1(r_0 \sqrt{k_m^2 + k_n^2})}{r_0 \sqrt{k_m^2 + k_n^2}} \quad (14)$$

Аналогично для круглых  $r_0$  или квадратичных  $(a_1 \times a_1)$  отверстий в перфорациях панели соответственно получим

$$I_{ms}^{(0)} = \frac{z_m z_n}{S} \sum_i S_i \left[ \frac{\sin k_m a_1}{k_m a_1} \frac{\sin k_n a_1}{k_n a_1} \right] \frac{2J_1(r_0 \sqrt{k_m^2 + k_n^2})}{r_0 \sqrt{k_m^2 + k_n^2}} \quad (15)$$

Величины сопротивления  $\widehat{r}_{0r}$  значений (11) определяются по формулам

$$\widehat{r}_{0r} = 8\pi\eta (1 + 2\delta_0) \frac{4S_0}{\pi d_0^2} \varphi_r \left( \frac{d_0}{2} \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} \right),$$

$$\widehat{r}_{1r} = 8\pi\eta (\tau + 2\delta_1) \frac{S_1}{\pi a_0^2} \varphi_r \left( a_1 \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} \right), \quad (16)$$

$$d_0 = \frac{4S_0}{\Pi_0}, \quad \delta_0 = 0,85d_0, \quad a_1 = 4T_1/\Pi_1.$$

Функция  $\varphi(x)$  универсальна и результаты численных расчетов можно представить в виде таблицы,

Таблица

| $x$            | $10^{-2}$         | $10^{-1}$         | 0,3                 | 1    | 2     | 3    | 5    | 10   | 30  | 50   |
|----------------|-------------------|-------------------|---------------------|------|-------|------|------|------|-----|------|
| $\varphi_r(x)$ | 1                 | 1                 | 1                   | 1    | 1,05  | 1,2  | 1,67 | 2,9  | 7,9 | 12,9 |
| $\varphi_i(x)$ | $8 \cdot 10^{-8}$ | $8 \cdot 10^{-3}$ | $0,7 \cdot 10^{-2}$ | 0,08 | 0,032 | 0,03 | 1,19 | 2,05 | 7,5 | 12,5 |

где  $x = a(0,5\rho^{-1}\omega)^{0,5}$ ;  $\nu = \eta/\rho$  — кинематическая вязкость ( $\nu = 0,14 \text{ см}^2/\text{с}$ );  $\rho = 1,81 \cdot 10^{-1} \text{ дин-с/см}$ ;  $\rho = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ , а  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S$  — соответственно площади входных сечений горловины, отверстий перфораций и сечения резонансного звукопоглотителя;  $m_r$ ,  $m_1$ ,  $m_{1,2}$ ,  $m_n$  и  $M_r$ ,  $M_0$ ,  $M_{1,2}$ ,  $M_n$  — невозмущенные и возмущенные массы воздуха в отверстиях горловины, перфорациях, сечениях резонирующей панели и масса внутренней податливой панели на упругих связях, присоединенные и взаимоприсоединенные массы, содержащие соколеблющиеся

массы окружающей среды на концевую поправку входных отверстий резонансного звукопоглотителя.

Величинами  $r_{01}^{\omega}$  и  $r_{12}^{\omega}$  в выражениях (11) по сравнению с  $m_1$ ,  $m_2$  можно пренебречь, тогда при  $S \gg S_0$ ,  $I_{m2} \rightarrow 0$  и  $M_2 \rightarrow 0$ ,  $M_{12} \rightarrow 0$  и приближении по функции Фока имеем

$$M_{0,1} = \frac{2}{S_0} (l_0 + 0.82d_0), \quad M_2 = 0. \quad (17)$$

Комплексность выражения (10), а также сложность вычисления суммарного импеданса собственных мод с различными значениями индексов значений (11) — (16) затрудняют практическое использование теоретических формул. Для системы резонансных звукопоглотителей, состоящих из последовательно соединенных резонаторов, согласно упрощенной физико-математической модели и на основе сравнительного анализа экспериментальных данных для установления эмпирических выражений в зависимости от физико-технических параметров РЗП с учетом рекомендаций Маа-Дах-Ю и Н. Н. Ворониной [2, 3] входной импеданс  $Z_{p0} = R_{p0} + jY_{p0}$  вычисляют согласно выражению

$$Z_{p0} = (R_{p0} + R) + j(Y_{p0} + Y), \quad R = R_{p0} (Y_{p0} - Y_{\text{вх}})^2 E, \quad (18)$$

$$E = R_{p0}^2 + (Y_{p0} - Y_{p1} - Y_{\text{вх}})^2, \quad Y = -(Y_{p0} + Y_{p1} - Y_{\text{вх}})(Y_{p0} - Y_{\text{вх}})^2 E.$$

При наклонном падении звуковой волны под углом  $\theta$  на резонансный звуковой поглотитель, в воздушной полости которого имеются перегородки с шагом  $b < \lambda_p/4$ , инерционный локальный импеданс вычисляют согласно формуле:  $Y_1^{\text{в}} = (Y + Y_{p1}) \cos \theta$ , а при отсутствии перегородок —  $Y_1^{\text{в}} = Y \cos \theta + X_1^{\text{в}}$ . В диффузном звуковом поле:  $\theta = 0^\circ, 10^\circ, \dots, 80^\circ$ , но обычно принимают  $\theta = 45^\circ$  и вычисление КЗП производят по формуле (18), в которой  $R_{p1,2}$ ,  $Y_{p1,2}$  — действительные и мнимые компоненты импеданса, и согласно (10) вычисляют

$$Y_{\text{вх}} = k(l_r + 2\delta_0)/\gamma_0, \quad Y_2 = k(\tau + 2\delta_1)/\gamma_p, \quad Y_{\text{вх},2} = -\text{ctg} k l_{1,2}, \quad (19)$$

$$Y_{p1} = Y_{\text{вх}} + Y_{p1} + Y_2, \quad Y_{p2} = Y_{p2} + Y_1 + Y_2, \quad Y_1 = 0.2[Y_1 + (2Y_1)^{0.5}].$$

Рассмотрены зависимость соотношения резистанса  $Y_{\text{вх}}/Y_p$  входной горловины и внутренней панели резонатора в функции  $l_{1,2}$ ,  $L$ , реактанса  $R(kl)$  от волнового параметра  $kl$  и количественная оценка влияния физико-технических параметров  $r_0$ ,  $l$ ,  $\gamma_0 = (r_0/\gamma)^n = a_1 b_1 / ab = 64/625$  на величины инерционного импеданса, концевой поправки  $\delta$  и присоединенной массы  $M_{\text{пл}}$ . Эксперимент показал, что дополнительная инерционность перфорированной внутренней панели, обусловленная влиянием ближнего поля, будет проявляться тем сильнее, чем больше концевая поправка, радиус отверстия горловины, глубина резонирующей полости и чем меньше коэффициент перфорации  $\eta$ .

$S_{\pi} \wedge H \cong S_{\rho} \oplus \mathbb{Z}$ 

1. Гаспарян Ю. А. и др. Волновой процесс в многорезонансной колебательной системе звукопоглощающих строительных конструкций // ДАН АрмССР.—1990.—Т. 90, № 4.—С. 172—179.
2. Воронина Н. Н. Пособие по расчету и проектированию многослойных звукопоглощающих систем.—М.: Стройиздат, 1987.—23 с.
3. Man Dik You. Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions//Scientifica Technica - 1975. — V. 18, № 1. — P. 55-71.

20. XII. 89

ЭНЕРГЕТИКА

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕЖИМАМ ЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАБОТОВ

Էներգետիկայի Հայկական գիտահետազոտական ինստիտուտում մշակված ալգորիթմի, մեկնողական զրոյվների և էլեկտրական համակարգի (էՀ) կաշտակցված ուժիմի հաշվարկի ծրագրի նիման ըստ առաջարկվում է Հայկական էՀ ուժիմների հատաժառույթի իրադրմանը ըստ նրա էլեկտրական շրջանների (էՇ) ուժիմների, Ալգորիթի մուտքեցմամբ Հայկական էՀ էլեկտրո-էներգետիկական խնդիրների լուծումը էՀ-ի վրա հնարավորություն կտա զգալիորեն բարձրացնել լուծվող խնդիրների լուծվող և կրճատել նրանց յուրման ժամանակը էՀ-ի ուժիմների ուսումնասիրությունը ըստ նրա էՀ-ի հնարավորություն կտա ուժիկի լրիվ և տեսանելի հիմնով ներդրալացնել ռաբարաշխման սպառիչքը և հղորություն կորուստների տարարաշխումը ըստ էՀ-ի և նախը կապերի:

1112

Расчет УР современных ЭС затрудняется ввиду: количественного усложнения их схем, вызванного необходимостью адекватного отражения электроэнергетических процессов; специфических особенностей задаваемых режимных и схемных параметров; наложения ограничений на режимные параметры, которым для обеспечения надежности и надлежащего качества электроэнергии должен удовлетворять определяемый УР. Схемы отдельных электрических районов (ЭР), входящих в ЭС, могут насчитывать десятки узлов и замкнутых контуров. При этом методы расчета по управлению режимами ЭС должны преодолевать существенные вычислительные трудности, вызванные высоким порядком решаемых уравнений состояния системы. Разработки алгоритмов, основанных на классических методах анализа ЭС, использующих быстроедействие и большой объем памяти современных ЭВМ, не могут в полной мере удовлетворять требованиям практики. В связи с этим очевидна важность увеличения эффективности вычислений за счет специальных методов анализа схем ЭС. Одним из перспективных путей исследования режимов ЭС является переход от исходной сложной системы к исследованию более простых, по свойствам которых можно определить режим исходной системы. Эффективным способом реализации этой идеи является разделение системы на изолированные части [1]. Перспективность алгоритмов решения по частям для многочисленных задач, возникающих в различных приложениях по управлению режимами ЭС, в значительной степени определяется тем, что их структура хорошо совмещается со сложившейся структурой формирования и управления ЭС.

Для ЭС характерно наличие в их составах ЭР, включающих большое количество узлов, связанных густой сетью связей, причем ЭР связаны друг с другом относительно небольшим количеством линий электропередач. Сечения, проведенные в схемах ЭС через узлы связей этих линий, пересекают малое количество ветвей. При этом характерной особенностью для схем ЭР является блочная структура коэффициентов уравнений, описывающих УР. Очевидно, что если хранить в оперативной памяти ЭВМ только параметры схемы и режима отдельных ЭР и оперировать ими с дальнейшей координацией результатов их решений, то можно решать задачи большой размерности и существенно повысить эффективность расчетов.

В связи с возможностью исследования ЭС по ее ЭР создаются условия для более точного учета физических и топологических свойств и особенностей схем и их элементов, что позволит установить правильную картину потокораспределения и структуру потерь мощности по ЭР и их связям.

Выделение в системе ЭР может быть осуществлено разрезанием соответствующих ветвей по узлам их связей в схеме ЭС или по некоторым участкам этих ветвей. В первом случае граничными узлами будут узлы связей, во втором образуются дополнительные узлы, отсутствующие в исходной схеме ЭС. В свою очередь, разрезание вет-



вей в узлах их соединения может осуществляться удалением ветви, разрезанной с обоих концов соединения ее в схеме системы или оставлением ветви в схеме одного из связанных этой ветвью ЭР, разрезанием лишь в одном из узлов соединения. В первом случае, когда в узле связи ЭР инцидентны несколько удаляемых ветвей, нужно, чтобы этот узел принадлежал схеме одного из изолированных ЭР. Второй способ деления схемы ЭС на ЭР может оказаться целесообразным и случае, когда в узле связи двух ЭР инцидентны несколько ветвей. Исходя из вышеизложенных соображений, разделение схемы ЭС, заданной перечнем ветвей, идентифицируемых номерами ограничивающих их узлов, осуществляется заданием перечня разрываемых ветвей.

При определении УР ЭС по режимам ее ЭР приходится сталкиваться со следующей особенностью схем ЭС. Матрица узловых проводимостей исходной неразделенной системы имеет обратную матрицу, а ЭР — нет. Чтобы преодолеть затруднения, возникающие при решении уравнений узловых напряжений (УУН) ЭР, необходимо ввести пассивные поперечные элементы в схемы таких ЭР. Этим мы вносим изменения в схему пассивных параметров ЭР и системы в целом. Чтобы устранить воздействие этих изменений, в соответствующих узлах связей ЭР подключаются пассивные ветви, имитирующие изменения в схеме ЭС. Уравнения состояния этих ветвей составляются и решаются совместно с уравнениями связей ЭР.

Исходные схемные и режимные параметры ЭС задаются в формах, свойственных решению УР. Схема ЭС путем удаления ветвей связей (ВС) расчленяется на несвязанные ЭР. При этом в схемах ЭР в узлах ВС остаются включенными узловые нагрузки и поперечные проводимости — емкостная проводимость и проводимость потерь на корону при П-образной схеме замещения линий электропередач, проводимость шунтирующего реактора. Узловой нагрузкой считается также соответствующая составляющая тока источника напряжения (базисный узел с заданным напряжением), прилагаемого в узле связи ЭР, с которым связан базисный узел удаляемой ВС.

Задача сводится к определению дополнительных активных узловых параметров, вызванных включением ВС и ветвей, имитирующих отключение ветвей заземлений (ВЗ), воздействием которых на схемы ЭР в их соответствующих узлах связей восстанавливается схема фактического потокораспределения системы по ее ЭР.

Разработанный алгоритм расчета УР ЭР, входящих в ЭС, сводится к следующему:

- 1) составляется матрица узловых проводимостей  $Y_{mm}$  и определяется матрица узловых сопротивлений  $Z_{mm} = Z_{mm}^{-1}$  ЭР;
- 2) задавая приближенные значения узловых напряжений, решаются уравнения

$$U_{\alpha\beta} = Z_{mm} (U_{\alpha\beta}^{-1} S_{\alpha\beta} + Y_{\alpha\beta} U_{\alpha\beta}), \quad (1)$$

где  $\hat{U}_{n(n)}^{-1}$  — обратная диагональная матрица комплексно-сопряженных узловых напряжений;  $\hat{S}_m$  — столбцовая матрица комплексно-сопряженных узловых мощностей;  $\hat{Y}_{mn}$  — столбцовая матрица проводимости ветвей, соединяющих независимые узлы ЭР с базисным, с учетом элемента трансформации и ветви;  $\hat{U}_0$  — напряжение базисного узла.

3) падения напряжений в ВС и ВЗ, соответствующих напряжениям, вычисленных в п. 2, определяются по формуле

$$\Delta \hat{U}_n = -\hat{C}_{nc} \hat{U}_{cy}, \quad (2)$$

где  $\hat{C}_{nc}$  — матрица соединений ВС и ВЗ;

4) токи в ВС и ВЗ равны

$$\hat{I}_n = (\hat{C}_{nc} \hat{Z}_{cc} \hat{C}_{cn} + \hat{Z}_{n(n)})^{-1} \Delta \hat{U}_n, \quad (3)$$

где  $\hat{Z}_{cc}$  — квазидиагональная матрица узловых сопротивлений относительно узлов связей ЭР,  $\hat{C}_{cn}$  — матрица соединений токов  $\hat{I}_n$  в узлах связей ВС и ВЗ [2],  $\hat{Z}_{n(n)}$  — диагональная матрица сопротивлений ВС и ВЗ. Если деление схемы ЭС на ЭР осуществляется по узлам связей без удаления ветвей, то очевидно, что для таких связей в матрице  $\hat{Z}_{n(n)}$  соответствующий элемент равняется нулю;

5) токи в узлах связей ЭР, вызванных токами  $\hat{I}_n$  —

$$\hat{I}_c = \hat{C}_{cn} \hat{I}_n; \quad (4)$$

6) узловые напряжения ЭР от токов  $\hat{I}_c$  —

$$\hat{U}_{m1} = \hat{Z}_{m1} \hat{I}_c, \quad (5)$$

где  $\hat{Z}_{m1}$  получается из матрицы  $\hat{Z}_{mnl}$ , если оставить в ней столбцы с индексом „с“, относящиеся к узлам ВС;

7) результирующие узловые напряжения ЭР —

$$\hat{U}_m = \hat{U}_{my} + \hat{U}_{m1}. \quad (6)$$

В случае, когда в ЭС имеются узлы, для которых заданы модули напряжения  $U_n$ , то из уравнений (1), а если узел с заданным  $U_n$  является узлом связи ЭР, то и из (5) после последовательной подстановки в последнее (1), (3), (2) отдельно для каждого узла по ЭР выделяются уравнения, относящиеся к узлам с заданным  $U_n$ , которые решаются совместно с уравнением

$$U_n^2 = (U_{ny}^* + U_{m1}^*)^2 + (U_{ny}^* + U_{m1}^*)^2,$$

где  $U_{ny}^*$ ,  $U_{m1}^*$ ,  $U_{ny}^*$ ,  $U_{m1}^*$  — действительные и мнимые составляющие напряжений  $U_{ny}$  и  $U_{m1}$ .

Согласно предложенной методике схема замещения Армянской ЭС, состоящая из 187 узлов и 217 ветвей удалением ветвей: 1—51, 1—182, 1—220, 7—192, 19—96, 24—283, 31—216, 49—62, 51—202, 58—221, 68—202, 75—216, 96—241, 96—243, 126—182, 126—202, 131—190, 190—226 и разрезанием в узлах: 208 и 224 делится на следующие не связанные ЭР (рис.): Северный —  $n=31$ ,  $v=34$ ; Восточный —  $n=35$ ,  $v=38$ ; Запад —  $n=13$ ,  $v=13$ ; Центральный —  $n=39$ ,  $v=43$ ; Западный —  $n=17$ ,  $v=17$ ; Южный —  $n=52$ ,  $v=55$ ;  $n$  — число узлов,  $v$  — число ветвей в схемах ЭР. Заметим, что полученные схемы ЭР в основном совпадают с схемами предприятий электрических сетей Армянской ЭС.

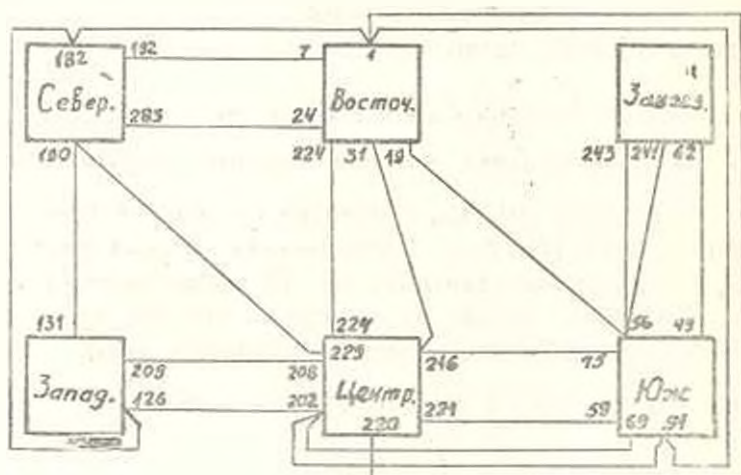


Рис. Схема соединения ЭР Армянской ЭС.

На основе разработанных в АрмНИИ энергетики алгоритма, методических положений и программы определения УР делением схемы ЭС на части, предлагается исследование режимов Армянской ЭС осуществлять по режимам ее ЭР, что позволит рассматривать электроэнергетические процессы ЭР в единстве их развития и взаимосвязанности, обеспечивая эффективность использования ЭВМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям—диагностика.—М.: Наука, 1972.—543 с.
2. Амирян Р. А., Шарбаханян И. И. Расчет режимов сложных систем методом деления на подсистемы // Электричество.—1983.—№ 6.—С. 54—55.

А. В. АЛЕКСЕЕВСКИЙ

# К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗОНЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАТУШЕК НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ АППАРАТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Предлагается математическая модель для расчета обмоточных данных и размеров катушек низковольтных электрических аппаратов, позволяющая оценить их зависимость от конфигурации и габаритных размеров каркаса. Определены границы зоны оптимального проектирования таких катушек, для которой конфигурация каркаса и технико-экономические показатели обмоток являются наиболее целесообразными.

Ил. 2. Библиогр.: 2 назв.

Վառարկվում է մաթեմատիկական մոդել՝ ցածր լարման էլեկտրական ապարատների (կապակցված փաթույթային տվյալների և մախակող պարամետրերի հաշվարկի համար, որը բուն է ապրի-զնախանի նրանց կախումը հիմնականների էզրաններից և չափսերից: Այդ կոճերի բարենպաստ նախագծման համար որոշված են զոտոն սահմանները, որոնց համար հիմնականների էզրանը և փաթույթների տեխնիկատեխական ցուցանիշները առավել նպատակահարմար են:

При инженерных расчетах шунтовых катушек низковольтных электромагнитных аппаратов (НЭМА) обычно пользуются формулами, приведенными в [1, 2], которые позволяют определить обмоточные данные катушки для обеспечения требуемой *м.д.с.* в режиме длительного включения и допустимого перегрева медного эмали-провода обмотки. Однако, получаемые при этом значения обмоточных данных носят поверочный характер, т. к. относятся к конкретной катушке с заранее заданными размерами и конфигурацией обмоточного окна каркаса. Поэтому представляется целесообразным проанализировать зависимость обмоточных данных катушек НЭМА во всем многообразии их исполнений по конфигурации и размерам каркаса с тем, чтобы определить зону оптимального проектирования, в границах которой следует выбирать рациональные соотношения габаритных размеров каркаса (наружный диаметр и высота) и оценивать ожидаемые технико-экономические показатели обмотки (расход эмали-провода и величину греющих потерь).

В качестве исходных данных при расчете катушек принимаются: напряжение сети по токовому току  $U_n$ , требуемая *м.д.с.*  $F_n$ , внутренний диаметр каркаса под намотку  $d_1$ , удельное сопротивление меди при длительной допустимой температуре эмали-провода выбранной марки  $\gamma_n$ , плотность меди  $\gamma_m$ , наружный диаметр  $D_1$  и высота каркаса  $h_1$ . Тогда из выражения для *м.д.с.* обмотки  $F_n = U_n W_1 R_1$ , где  $W_1$  — число витков обмотки,  $R_1 = \gamma_n l_1 W_1 / \pi$  — сопротивление нагреваемой обмотки в режиме длительного включения,  $l_1 = \pi(D_1 + d_1)/2$  —



средняя длина витка обмотки,  $q_1 = \pi \Delta_1^2/4$  — сечение меди эмали-провода, можно определить диаметр меди эмали-провода  $\Delta_1$ , а также остальные обмоточные данные катушки, выполненной в каркасе с конкретными значениями размеров  $D_1$ ,  $d_1$ ,  $h_1$ .

Для исследования зависимости обмоточных данных такой катушки от изменения размеров  $D_1$ ,  $h_1$  и конфигурации каркаса при условии постоянства значений  $U_1$ ,  $F_1$ ,  $d_1$ ,  $q_1$ , а также площади окна каркаса  $Q_1 = (D_1 - d_1) h_1/2 = \text{const}$ , целесообразно в качестве аргумента в расчетных формулах принять отношение диаметров каркаса  $d_1/D_1 = K_d$ . Внутренний диаметр  $d_1$ , определяемый диаметром стержня магнитопровода и толщиной стенки каркаса, будет постоянным при всех конфигурациях каркаса, а наружный диаметр  $D_1$  может изменяться в широких пределах, определяемых неравенством  $0 < K_d < 1$ . Его значение в относительных единицах будет равно  $D = D_1/d_1 = K_d^{-1}$  (без индекса «1»). Расчетный эскиз катушек с различной конфигурацией каркаса при  $K_d = 0,2, 0,4, 0,6$  приводится на рис. 1. Из него следует, что изменение конфигурации каркаса и соотношение между его размерами при постоянстве площади окна исходных данных будут существенно влиять на среднюю длину витка обмотки, ее боковую поверхность  $S_1 = \pi D_1 h_1$ , а также на обмоточные данные.

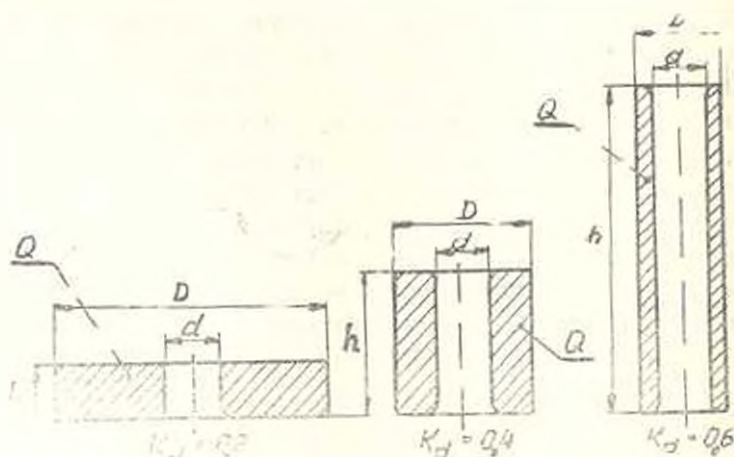


Рис. 1. Расчетный эскиз катушек при  $K_d = 0,2, 0,4, 0,6$ .

Диаметр меди эмали-провода, полагая  $I_1 = a_1(1 + K_d^{-1})/2$ , будет равен

$$\Delta_1 = \sqrt{2F_1 q_1 d_1 (1 + K_d^{-1}) \cdot U_1} \quad (1)$$

или, в относительных единицах (без индекса «1») —

$$\Delta = \Delta_1/K_1 = \sqrt{1 + K_d^{-1}}, \quad \text{где } K_1 = \sqrt{2F_1 q_1 d_1 U_1} = \text{const.}$$

Число витков обмотки будет равно

$$W_1 = 2Q_1 U_1 f_1 / \pi p_1 d_1 F_1 (1 + K_d^{-1}) \quad (2)$$



или в относительных единицах —

$$W = W_1/K_2 f_1 = 1/(1 + K_d^{-1}),$$

где  $K_2 = 2Q_1 U_1 / \pi r_1 d_1 F_1^2 = \text{const}$ , а  $f_1 < 1$  — коэффициент заполнения окна кархаса по меди, зависящий от марки и диаметра меди эмаль-провода.

Сопротивление обмотки

$$R_1 = 2Q_1 U_1^2 f_1 / \pi r_1 d_1 F_1^2 (1 + K_d^{-1}) \quad (3)$$

или в относительных единицах

$$R = R_1/K_2 f_1 = 1/(1 + K_d^{-1}), \quad \text{где } K_2 = 2Q_1 U_1^2 / \pi r_1 d_1 F_1^2 = \text{const}.$$

Ток обмотки

$$I_1 = \pi r_1 d_1 F_1^2 (1 + K_d^{-1}) / 2Q_1 U_1 f_1 \quad (4)$$

или в относительных единицах —

$$I = I_1 f_1 / K_2 = 1 + K_d^{-1}, \quad \text{где } K_2 = \pi r_1 d_1 F_1^2 / 2Q_1 U_1 = \text{const}.$$

Мощность греющих потерь

$$P_1 = \pi r_1 d_1 F_1^2 (1 + K_d^{-1}) / 2Q_1 f_1 \quad (5)$$

или в относительных единицах —

$$P = P_1 f_1 / K_2 = 1 + K_d^{-1}, \quad \text{где } K_2 = \pi r_1 d_1 F_1^2 / 2Q_1 = \text{const}.$$

Удельная охлаждающая поверхность, полагая

$$h_1 = 2Q_1 / d_1 (K_d^{-1} - 1) \text{ и } S_1 = 2\pi Q_1 / (1 - K_d),$$

будет равна

$$\pi_1 = S_1 / P_1 = 4Q_1^2 f_1 K_d / F_1^2 r_1 d_1 (1 - K_d^2) \quad (6)$$

или в относительных единицах —

$$\pi = \pi_1 / K_d f_1 = K_d / (1 - K_d^2), \quad \text{где } K_d = 4Q_1^2 / F_1^2 r_1 d_1 = \text{const}.$$

Масса меди эмаль-провода

$$G_1 = \pi r_1 d_1 Q_1 f_1 (1 + K_d^{-1}) / 2 \quad (7)$$

или в относительных единицах —

$$G = G_1 / K_1 f_1 = 1 + K_d^{-1}, \quad \text{где } K_1 = \pi r_1 d_1 Q_1 / 2 = \text{const}.$$

Общая экономичность катушек при различных значениях  $K_d$  может оцениваться коэффициентом использования, равным

$$\eta_1 = F_1^2 / P_1 G_1 = 1 / r_1 \gamma_1 L_1^2 = 4 / \pi^2 r_1 \gamma_1 d_1^2 (1 + K_d^{-1})^2 \quad (8)$$

с возрастанием которого улучшается использование эмаль-провода в обмотке. В относительных единицах:

$$\eta = \eta_1 / K_d = (1 + K_d^{-1})^{-2}, \quad \text{где } K_d = 4 / \pi^2 r_1 \gamma_1 d_1^2 = \text{const}.$$

Характеристики расчетных значений обмоточных данных и отдельных параметров катушек для различных значений  $0 < K_d < 1$  приводятся на рис. 2.

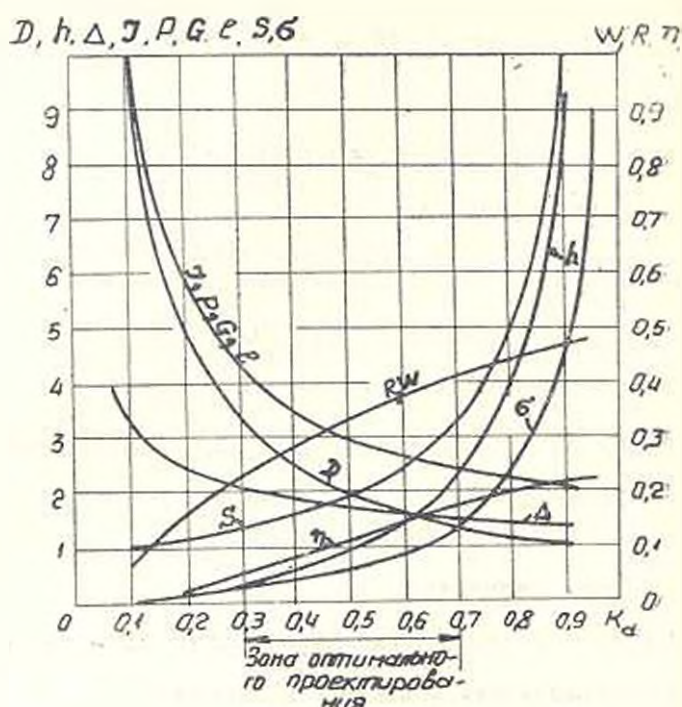


Рис. 2. Зависимость обмоточных данных и параметров катушки от  $K_d$ .

Полученные данные позволяют судить только о качественном характере изменения обмоточных данных и параметров катушек, т. к. интенсивность их изменения для каждой конкретной катушки, в рассматриваемом диапазоне  $0 < K_d < 1$  будет зависеть также и от принятых исходных данных  $U_1, F, \rho_1, d_1, Q_1$  и коэффициента заполнения  $f_1$ .

Из характеристики  $\eta = f(K_d)$  следует, что коэффициент использования и экономичность катушек существенно возрастают с увеличением  $K_d$  и соответствующем уменьшении средней длины витка обмотки. При значениях  $K_d < 0,3$ , когда конфигурация окна каркаса представляет вытянутый вдоль наружного диаметра прямоугольник (рис. 1), средняя длина витка весьма велика и коэффициент использования для катушек в этой области получается низким (значительные греющие потери и расход эмали-провода). При значениях  $K_d > 0,7$ , когда конфигурация окна каркаса представляет вытянутый вдоль высоты каркаса прямоугольник (рис. 1), средняя длина витка существенно уменьшается и коэффициент использования для катушек в этой области значительно больше. Однако, при резко выраженной вертикальной конфигурации окна каркаса одновременно существенно увеличиваются: длина магнитопровода и масса стали, поток рассея-

шии между стержнями сердечника и, соответственно, первоначально заданное значение исходной м.д.с. обмотки  $F_1$ . Кроме того, в этой области  $K_n$  число витков обмотки возрастает при одновременном уменьшении диаметра меди эмаль-провода и коэффициента заполнения. Указанные обстоятельства приводят к удорожанию обмотки за счет увеличения трудоемкости намотки и стоимости эмаль-провода, а также к нежелательному увеличению габаритов и массы электромагнита в целом.

Таким образом, на основании полученных расчетных формул и результатов их анализа, границами зоны оптимального проектирования катушек НЭМЛ следует принять значение аргумента  $0,3 < K_n < 0,7$ , при которых конфигурация и габаритные размеры каркаса приемлемы как по конструктивным соображениям, так и по технико-экономическим показателям обмотки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чунизян А. А. Электрические аппараты.—М.: Энергия, 1975.—647 с.
2. Славинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты.—М.: Энергия, 1972.—247 с.

СКБ АПО «Электрон»

8 XII, 1990

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 3, 1991, с. 121—125

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.324

А. Г. ТАРХАНЯН, А. А. ТЕРЕЩЕНКО, И. Г. ХАЧИЯН

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА И МЕСТ УСТАНОВКИ ТРАНСПОРТНЫХ СТАНЦИЙ В ЛОКАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Описывается метод решения задачи определения числа и мест установки транспортных станций в локальной вычислительной сети, архитектура которой соответствует международному стандарту 8802.7. Метод используется при синтезе топологии локальных вычислительных сетей. Он позволяет минимизировать число транспортных станций сети и объем информации, передаваемой через сеть. В рамках метода задачи определения мест установки транспортных станций представляется в виде системы нелинейных неравенств от трех переменных. Предлагается способ решения этой системы на основе геометрической интерпретации исходной задачи.

Библиогр.: 2 назв.

Նախադրվում է այն տեղադրել հաշվողական ցանցի տրանսպորտային կայանների թիվը և տեղեր որոշման խնդիր լուծման միջոցը, որի հատկությամբը համապատասխանում է 8802.7 միջազգային ստանդարտին: Մեթոդը օգտագործվում է տեղադրել հաշվողական ցանցերի տոպոլոգիայի համադրման ժամանակ: Այն նախադրություն է տալիս ցանցի, տրանսպորտային կայանների թվի և ցանցի միջոցով փոխանցվող տեղեկության ծավալը հասցանի երկարությունի: Մեթոդի շրջանակներում տրանսպորտային կայանների տեղերի որոշման խնդիր ներկայացվում է երեք փոփոխականների ուղիղ անհավասարությունների համակարգի մեծ: Առաջարկվում է այդ համակարգի լուծման միջոցը: Այսպեսով խնդիրը կարգավորվում է մեկնաբանության հիման վրա:

Автоматизация производственно-хозяйственной деятельности на современном этапе характеризуется широким внедрением локальных вычислительных сетей (ЛВС). Одной из проблем, возникающих при внедрении ЛВС, является проблема синтеза топологии: определение числа и мест установки транспортных станций (ТС); определение множества ЭВМ, подключаемых в каждой ТС; выбор связей между ЭВМ, объединяемых ЛВС.

В данной работе предлагается метод решения первых двух из указанных задач применительно к конкретной ЛВС [1], которая имеет следующие характеристики: архитектура ЛВС соответствует международному стандарту 8802.7; количество ЭВМ, объединяемых ЛВС, не более 255; количество ЭВМ, подключаемых к каждой ТС, не более 8; максимально допустимое удаление ЭВМ от ТС не более 15 м и др. Метод позволяет минимизировать стоимость ЛВС при выполнении ограничений на вероятностно-временные характеристики решаемых в ЛВС задач. В рамках метода минимизация стоимости ЛВС сводится к уменьшению числа ТС, а учет ограничений на вероятностно-временные характеристики решаемых в ЛВС задач — к минимизации объема информации, передаваемой через сеть.

Множество ЭВМ, подключаемых к одной ТС, будем называть кластером. Для определения числа ТС и множества ЭВМ, входящих в каждый кластер, в рамках метода разработан субоптимальный алгоритм. При выполнении каждого шага этого алгоритма уменьшается количество кластеров за счет объединения двух кластеров в один. Причем объединяются те два кластера, для которых объем информации, обмениваемой между входящими в их состав ЭВМ, максимален и выполняются следующие два ограничения: количество ЭВМ, входящих в состав каждого кластера, не более 8; удаление каждой ЭВМ от соответствующей ТС не более 15 м. В качестве начального состояния в алгоритме рассматривается случай, когда в состав каждого кластера входит одна единственная ЭВМ. Выполнение алгоритма завершается, если на очередном шаге невозможно объединить никакие два кластера. Приведенный алгоритм имеет полиномиальную вычислительную сложность.

Определение мест установки ТС представляет собой самостоятельную задачу. Согласно методу решение этой задачи производится при проверке выполнимости ограничений на удаление ЭВМ от ТС. Ограничения на удаления ЭВМ от ТС для каждого  $i$ -го кластера ( $i = \overline{1, I}$ ) могут быть представлены в виде системы нелинейных неравенств

$$\begin{cases} (x_{0i} - x_j)^2 + (y_{0i} - y_j)^2 + (z_{0i} - z_j)^2 \leq R^2 \\ \text{для всех } 1 \leq j \leq 8. \end{cases} \quad (1)$$

В системе (1) с помощью индекса  $j$  обозначаются ЭВМ, входящие в  $i$ -ый кластер. В системе (1) используются также следующие обозначения:  $(x_j, y_j, z_j)$  — координаты мест установки ЭВМ в трехмерном



пространстве,  $(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$  — координаты места установки ТС  $i$ -го кластера,  $R$  — максимально допустимое удаление ЭВМ от ТС.

Для решения системы (1) в методе используется геометрическая интерпретация исходной задачи определения мест установки ТС, согласно которой задача представляется следующим образом: заданы координаты  $j$  ( $1 \leq j \leq 8$ ) точек  $(x_j, y_j, z_j)$  в трехмерном пространстве, каждая из которых соответствует месту установки одной ЭВМ; необходимо найти координаты центра шара  $(x_0, y_0, z_0)$  минимального радиуса, не превышающего значения  $R$  и включающего в себя все  $j$  точки; координаты центра шара  $(x_0, y_0, z_0)$  определяют место установки ТС. Не теряя общности, рассмотрим решение задачи для предельного случая, когда заданы координаты 8 точек. Решение задачи основано на следующих очевидных утверждениях:

1. Для любых восьми точек в пространстве (в общем случае для произвольного числа точек) существует один и только один шар минимального радиуса, который включает в себя все эти точки.

2. Каждый шар однозначно определяется либо двумя точками, лежащими на концах его диаметра, либо тремя точками, лежащими на окружности большого круга шара, либо же четырьмя точками, лежащими на поверхности шара и не принадлежащими одной плоскости [2].

Алгоритм решения задачи.

Шаг 1. Вычислять длины отрезков, соединяющих каждые две точки, и найти максимальную из них

$$L = \max_{(j_1, j_2=1, 8)} (V(x_{j_1} - x_{j_2})^2 + (y_{j_1} - y_{j_2})^2 + (z_{j_1} - z_{j_2})^2) \quad (2)$$

Шаг 2. Проверить условие  $L > 2R$ , если оно выполняется, то решение задачи не существует. В противном случае перейти к следующему шагу.

Шаг 3. Если только один из отрезков, соединяющих любые две точки, имеет длину  $L$ , то перейти к шагу 4. В противном случае, если хотя бы два из отрезков длины  $L$  имеют общую вершину, то перейти к шагу 6, иначе выполнить шаг 4 для каждого из отрезков длины  $L$ .

Шаг 4. Построить шар радиуса  $L/2$  с центром в середине отрезка длины  $L$ . Координаты центра этого шара —  $(x_0, y_0, z_0)$ . Проверить, включает ли в себя этот шар остальные шесть точек, т. е. выполняется ли неравенство

$$(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2 \leq (L/2)^2. \quad (3)$$

$(x_j, y_j, z_j)$  — координаты  $j$ -той точки. Если неравенство (3) выполняется для всех шести точек, то решение задачи получено. В противном случае перейти к следующему шагу.

Шаг 5. Проверить условие  $L = 2R$ , если оно выполняется, то решение задачи не существует. В противном случае перейти к следующему шагу.



Шаг 6. Получить все сочетания трех точек из восьми, не лежащих на одной прямой. Количество таких сочетаний не более чем  $C_8^3$ . Для каждого сочетания определить координаты центра  $(x_{0k}, y_{0k}, z_{0k})$  и радиус  $r_k$  круга, на окружности которого лежат соответствующие три точки  $(1 \leq k \leq C_8^3)$ . Получить последовательность, содержащую радиусы  $r_k$ , расположенные в порядке возрастания. Выполнить шаг 7, начиная с первого элемента этой последовательности.

Шаг 7. Построить шар радиуса  $r_k$  с координатами центра  $(x_{0k}, y_{0k}, z_{0k})$ . Проверить, включает ли в себя этот шар остальные пять точек, т. е. выполняется ли неравенство

$$(x_j - x_{0k})^2 + (y_j - y_{0k})^2 + (z_j - z_{0k})^2 \leq r_k^2, \quad (4)$$

где  $(x_j, y_j, z_j)$  — координаты  $j$ -той точки. Если неравенство (4) выполняется для всех пяти точек, то решение задачи получено. В противном случае повторить выполнение шага 7 для следующего элемента (радиуса  $r_k$ ) последовательности, полученной на шаге 6. Если при выполнении шага 7 для последнего элемента последовательности неравенство (4) не выполняется хотя бы для одной точки, то перейти к следующему шагу.

Шаг 8. Получить все сочетания четырех точек из восьми, не лежащих в одной плоскости. Количество таких сочетаний не более чем  $C_8^4$ . Для каждого сочетания определить координаты центра  $(x_{0k}, y_{0k}, z_{0k})$  и радиус  $r_k$  шара, на поверхности которого лежат соответствующие четыре точки  $(1 \leq k \leq C_8^4)$ . Получить последовательность, содержащую радиусы  $r_k$ , расположенные в порядке возрастания. Выполнить шаг 9, начиная с первого элемента этой последовательности.

Шаг 9. Построить шар радиуса  $r_k$  с координатами центра  $(x_{0k}, y_{0k}, z_{0k})$ . Проверить, включает ли в себя этот шар остальные четыре точки, т. е. выполняется ли для них неравенство (4). Если неравенство (4) выполняется для всех четырех точек, то решение задачи получено. В противном случае повторить выполнение шага 9 для следующего элемента (радиуса  $r_k$ ) последовательности, полученной на шаге 8. Если при выполнении шага 8 для последнего элемента последовательности неравенство (4) не выполняется хотя бы для одной точки, то решение задачи не существует. Выполнение алгоритма решения задачи завершено.

Для определения координат центра круга  $(x_{0k}, y_{0k}, z_{0k})$  при выполнении шага 6 необходимо решить систему уравнений (5) — (7)

$$\begin{cases} (x_1 - x_{01})^2 + (y_1 - y_{01})^2 + (z_1 - z_{01})^2 = (x_1 - x_{12})^2 + \\ + (y_1 - y_{02})^2 + (z_1 - z_{02})^2, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} (x_1 - x_{12})^2 + (y_1 - y_{12})^2 + (z_1 - z_{12})^2 = (x_1 - x_{23})^2 + \\ + (y_1 - y_{12})^2 + (z_1 - z_{23})^2, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{vmatrix} x_0 - x_1 & y_0 - y_1 & z_0 - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

В системе (5)–(7) с помощью (7) задается принадлежность трех точек и центра круга одной плоскости [2].

Для определения координат центра шара  $(x_{01}, y_{01}, z_{01})$  при выполнении шага 8 не нужно решать систему уравнений (8)–(10)

$$\begin{cases} (x_1 - x_{01})^2 + (y_1 - y_{01})^2 + (z_1 - z_{01})^2 = (x_2 - x_{01})^2 + \\ + (y_2 - y_{01})^2 + (z_2 - z_{01})^2, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} (x_1 - x_{01})^2 + (y_1 - y_{01})^2 + (z_1 - z_{01})^2 = (x_3 - x_{01})^2 + \\ + (y_3 - y_{01})^2 + (z_3 - z_{01})^2, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} (x_1 - x_{01})^2 + (y_1 - y_{01})^2 + (z_1 - z_{01})^2 = (x_4 - x_{01})^2 + \\ + (y_4 - y_{01})^2 + (z_4 - z_{01})^2. \end{cases} \quad (10)$$

Радиус круга  $r_0$  при выполнении шага 6 и радиус шара  $r_1$  при выполнении шага 8 определяются по формуле (11) после нахождения координат центра  $(x_{01}, y_{01}, z_{01})$

$$r_0 = \sqrt{(x_1 - x_{01})^2 + (y_1 - y_{01})^2 + (z_1 - z_{01})^2} \quad (11)$$

Предложенный метод реализован в виде комплекса программ на языке Турбо-Паскаль и используется при синтезе топологии ЛВС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тарханян А. Г., Хачиян Н. Г., Маркосян М. В. Выбор средств вычислительной техники для коммерческой информационно-вычислительной сети // 14-я Всесоюзная шк.-сем. по выч. сетям: Тез. докл. Москва—Минск, 1989. Ч. 1.—С. 135—139.
2. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.—М.: Наука, 1986.—544 с.

УДК 681.513

С. Е. ЧИМИШКЯН, Е. А. МЕРОЯН

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ  
МНОГОСВЯЗНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ  
СИНТЕЗА МНОГОРЕЖИМНЫХ САУ

Предложенный способ построения моделей многосвязных динамических объектов с учетом неопределенностей позволяет проектировать многорежимные системы автоматического управления. Рассмотрен иллюстративный пример построения модели и синтеза корректирующего устройства для астроследящей системы.

Ил. 3. Библиогр.: 4 назв.

Մոշարկված է բազմակապ դինամիկ օբյեկտների անորոշությունների մոդելների կառուցման եղանակ. որը թույլ է տալիս նախագծել բազմաոճիմ ավտոմատ կառավարման համակարգեր: Դիտված է աստղահետող համակարգի մոդելի կառուցման և հետզ հետո ուղղորդման ցուցադրական օրինակ:

В практических задачах автоматического управления характеристики линейризованной модели объекта управления часто оказываются переменными, будь то в силу смещения рабочей точки (точки линеаризации) либо явного изменения объекта (программное перестроение объекта, дрейф параметров и др.). При этом традиционные методы синтеза систем автоматического управления (САУ) с неперестраиваемыми (постоянными) регуляторами обычно не позволяют подучить приемлемые свойства устойчивости и качества. В этом случае одним из применяемых подходов является синтез многорежимного регулятора, позволяющего без перестроения достичь компромиссных свойств устойчивости и качества в определенной ограниченной области пространства параметров объекта. Среди известных концепций многорежимного управления весьма привлекательны своей «классичностью» частотные методы теории робастности [1]. В рамках последних отправным этапом проектирования САУ вида рис. 1 является построение специфичной линейной модели многосвязного объекта в виде номинальной частотной передаточной матрицы (ПМ)  $G(j\omega)$  и характеристики неструктуризованной неопределенности  $\Delta_G(\omega)$ , т. е. верхней границы отклонения реальной модели (частотной ПМ  $G(\gamma, j\omega)$ ) от номинальной. Здесь  $\gamma$  — вектор параметров, определяющих режим работы объекта, а  $\gamma \in \Gamma$ ,  $\Gamma$  — рассматриваемая область режимов.

Среди традиционных форм описания неопределенности [1] наиболее употребительными являются следующие:

а) аддитивная неопределенность —

$$G(\gamma, j\omega) = G(j\omega) + \Delta_{ad}(\gamma, j\omega), \quad \Delta_{ad}(\omega) = \sup_{\gamma \in \Gamma} \|G(\gamma, j\omega) - G(j\omega)\|, \quad (1)$$

б) мультипликативная неопределенность на входе объекта —

$$G(\gamma, j\omega) = G(j\omega) [I + \Delta G_{M1}(\gamma, j\omega)], \quad (2)$$

$$\Delta G_{M1}(\omega) = \sup_{\gamma \in \Gamma} \|G(j\omega)^{-1} G(\gamma, j\omega) - I\|_2;$$

в) мультипликативная неопределенность на выходе объекта —

$$G(\gamma, j\omega) = [I + \Delta G_{M2}(\gamma, j\omega)] G(j\omega), \quad (3)$$

$$\Delta G_{M2}(\omega) = \sup_{\gamma \in \Gamma} \|G(\gamma, j\omega) G(j\omega)^{-1} - I\|_2.$$

где  $\|A\|_2$  — спектральная норма матрицы  $A$  [2].

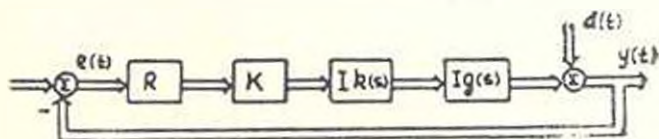


Рис. 1. Структурная схема САУ.

Процедура поиска частотной модели объекта в одной из указанных выше форм сводится к решению минимаксной задачи:

а) для аддитивной формы (1) —

$$\inf_{G(j\omega) \in \Gamma} \sup_{\gamma \in \Gamma} \|G(\gamma, j\omega) - G(j\omega)\|_2 = \Delta G_A(\omega), \quad \forall \omega \geq 0; \quad (4)$$

б) для мультипликативной формы (2) —

$$\inf_{G(j\omega) \in \Gamma} \sup_{\gamma \in \Gamma} \|G(j\omega)^{-1} G(\gamma, j\omega) - I\|_2 = \Delta G_{M1}(\omega), \quad \forall \omega \geq 0; \quad (5)$$

в) для мультипликативной формы (3) —

$$\inf_{G(j\omega) \in \Gamma} \sup_{\gamma \in \Gamma} \|G(\gamma, j\omega) G(j\omega)^{-1} - I\|_2 = \Delta G_{M2}(\omega), \quad \forall \omega \geq 0. \quad (6)$$

Задачу можно несколько упростить. Для этого следует, во-первых, использовать в выражениях (1)–(6) вместо спектральной нормы  $\|\Delta G(\gamma, j\omega)\|_2$  евклидову норму  $\|\Delta G(\gamma, j\omega)\|_F$ . Последняя вычисляется непосредственно по определению

$$\|\Delta G(\gamma, j\omega)\|_F = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\Delta g_{ij}(\gamma, j\omega)|^2 \right)^{1/2},$$

отличие от спектральной нормы, требующей специальной вычислительной процедуры — сингулярного разложения [2]. Однако это упрощение приводит к увеличению достаточности, т. к. имеет место лемма [3]:  $\|\Delta G(\gamma, j\omega)\|_2 \leq \|\Delta G(\gamma, j\omega)\|_F$ . Во-вторых, можно избежать решения минимаксной задачи в (4)–(6), выбирая квазиоптимальное значение  $G(j\omega)$  из числа реально существующих моделей  $G(\gamma, j\omega)$ , что также увеличивает достаточность.

В качестве примера рассмотрим синтез многорежимной системы стабилизации телескопа, размещенного на искусственном спутнике Земли (ИСЗ). При малых отклонениях по осям подвеса телескопа ( $1...2^\circ$ ) объект управления описывается ПМ вида [4]

$$G(\gamma, s) = R(\gamma)g(s), \quad (7)$$

где  $g(s)$  — передаточная функция сепаратного канала, обусловленная динамикой привода:

$$g(s) = \frac{100(0,2s + 1)}{s(s + 1)(0,0125s + 1)(0,008s + 1)}, \quad (8)$$

$R(\gamma)$  — матрица жестких связей [4]:

$$R(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma_1 & \sin \gamma_1 & 0 \\ -\sin \gamma_3 & \cos \gamma_3 & 0 \\ \sin \gamma_1 \sin \gamma_2 & -\cos \gamma_1 \sin \gamma_2 & \cos \gamma_2 \end{bmatrix}, \quad \gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

причем изменение исследуемого участка неба влечет за собой изменение системы звездных датчиков и, как следствие, изменение вектора параметров  $\gamma$ . Полная область режимов  $\Gamma$  определяется конструкцией телескопа как

$$\Gamma = \{\gamma \mid \gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3]^T, \quad |\gamma_i - \gamma_{i0}| \leq \Delta\gamma, \quad i = \overline{1, 3}, \quad \Delta\gamma = 25^\circ\}, \quad (10)$$

где  $\gamma_{i0}$  — значения углов для некоторого нейтрального положения датчиков.

Частный вид ПМ объектов (7) и обусловленный симметрией задачи квазипоптимальный выбор  $G(j\omega) = R(\gamma_0)g(j\omega)$  позволяет заменить задачу (4) на следующую

$$\sup_{\gamma \in \Gamma} \|R(\gamma) - R(\gamma_0)\| = \Delta_R, \quad (11)$$

$$\Delta_{0A}(\omega) = \Delta_R |g(j\omega)|,$$

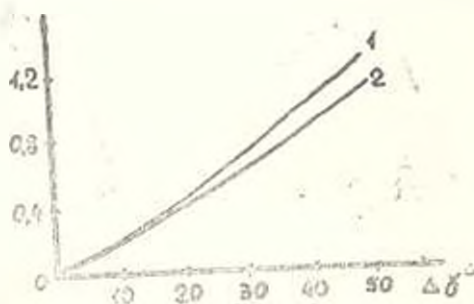


Рис. 2. Зависимость  $\Delta_R(\Delta\gamma)$ : 1 —  $\gamma_{10} = 20^\circ$ ,

$\gamma_{20} = 15,2^\circ$ ,  $\gamma_{30} = -15^\circ$ , 2 —  $\gamma_{10} = \gamma_{20} =$   
3 —  $\gamma_{10} = 10^\circ$ .

где область рассматриваемых режимов  $\Gamma' \in \Gamma$  определяется по аналогии с (10), но при разбросе углов  $\Delta\gamma \leq 25^\circ$ . На рис. 2 изображены графики зависимости  $\Delta_R$  от величины  $\Delta\gamma$  для ряда значений  $\gamma_{i0}$ , полученные численным решением задачи (11).

Многорежимная САУ вида разл. 1 должна обеспечить во всей рассматриваемой области режимов  $\Gamma'$  следующие свойства: а) устойчивость; б) установившуюся скоростную ошибку 1, 2" при маломальной скорости возмущающего движения ИСЗ  $120^\circ \text{ с}^{-1}$  (по нормативу); в) приемлемые запасы устойчивости, т. е. показатель колебательности



$M \leq 1,2$ . На основе методики [5] синтезируется корректирующее устройство с ПМ  $K(s) = Kk(s)$ . Матрица жестких связей  $k$  имеет сингулярное разложение [2]:  $K = \sum_{i=1}^3 k_i (v_i v_i^T)$ , определяемое сингулярным разложением матрицы  $R(\gamma_{21})$

$$K(\gamma_{21}) = \sum_{i=1}^3 r_{i0} (u_{i0} u_{i0}^T),$$

где  $u_{i0}$  и  $v_{i0}$  — левые и правые сингулярные векторы,  $r_{i0}$  и  $k_i$  — сингулярные числа (по определению  $r_{i0} \geq 0$  и  $k_i \geq 0$ ), причем для упрощения можно принять:  $k_1 = r_1^{-1}$ ,  $k_2 = r_2^{-1}$ ,  $1 \leq k_3 \leq r_3^{-1}$ .

Для синтеза САУ используем методику анализа свойств много-связанной САУ, описанную в [5]. Согласно этой методике, применительно к рассматриваемой САУ имеем:

а) условие устойчивости—

$$l(\omega) = \|K\|_2 \Delta_{GA}(\omega) \|k(j\omega)\| \min_i |1 + l(j\omega) g(j\omega) k_i r_{i0}| < 1, \quad \forall \omega \geq 0; \quad (12)$$

б) условие требуемой скорости ошибки—

$$\|e(\infty)\| \|d_{ex}\| = \lim_{t \rightarrow 0} \{\max_i |1 - k(s) g(s) k_i r_{i0}| \cdot (1 - l(s))\}, \quad (13)$$

где возмущение  $d(t) = d_0 \cdot t$ ,  $t \geq 0$ ;

в) условие требуемого показателя колебательности—

$$M \leq \max \left\{ \max_i |1 + (k(j\omega) g(j\omega) k_i r_{i0})^{-1}| + \frac{l(\omega)}{1 - l(\omega)} \max_i |1 - k(j\omega) g(j\omega) k_i r_{i0}| \right\}, \quad (14)$$

Положим желаемые значения  $M \leq 1,2$ ,  $\|e(\infty)\| \|d_{ex}\| \leq 1,2''/120'' = 10^{-2}$ , тогда, после элементарного упрощения выражений (12)–(14) имеем следующие условия для синтеза:

$$а) \quad l(\omega) = k_3 \Delta_R |g(j\omega)| \cdot \|k(j\omega)\| |1 + k_3 r_{30} g(j\omega) k(j\omega)| < 1, \quad (15)$$

$$\forall \omega \geq 0,$$

$$б) \quad \|d_{ex}\| \|e(\infty)\| \leq 10^2 \leq k_2 \|k(0)\| \lim_{s \rightarrow 0} |g(s) s| \cdot |r_{30} - \Delta_R|; \quad (16)$$

$$в) \quad M \leq \max \left\{ \max_i \frac{k_i r_{i0} |g(j\omega)| \cdot \|k(j\omega)\|}{|1 + k_i r_{i0} g(j\omega) k(j\omega)|} + \frac{l(\omega)}{(1 - l(\omega)) \min_i |1 - k_i r_{i0} g(j\omega) k(j\omega)|} \right\} \leq 1,2. \quad (17)$$

Рассмотрим конкретный случай:  $\gamma_{10} = 20^\circ$ ,  $\gamma_{20} = 15,2^\circ$ ,  $\gamma_{30} = -15^\circ$ ,  $\Delta\gamma = 10^\circ$ , при этом  $r_{10} = 1,27$ ,  $r_{20} = 1$ ,  $r_{30} = 0,62$ ,  $\Delta_R = 0,25$ ,  $k_1 = 0,79$ ,  $k_2 = 1$ ,  $1 \leq k_3 \leq 1,6$ .

Обеспечить условия (15)–(17) одной лишь статической коррекцией  $k(s) = k$  не удастся (нарушается условие (17)) и требуется введение динамической коррекции

$$k(s) = k \frac{(s+1)(T_1 s + 1)}{(0,2s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad T_1 > 1, \quad T_2 > 0,2.$$

Из четырех параметров синтеза ( $k$ ,  $k$ ,  $T_1$  и  $T_2$ ) в действительности свободными являются лишь  $k$  и  $T_2$ , т. к.  $T_1$  определяется из условия неизменности  $g(j\omega(k)j\omega)$  на средних и высоких частотах:  $T_1 = kT_2/5$ , а из (16) имеем:  $k = 1/(k_2(r_{10} - \Delta_R))$ . Варьируя  $k$  и  $T_2$  удается добиться выполнения всех условий (15)–(17) при наборе параметров  $T_1 = 8,45$ ,  $T_2 = 1$ ,  $k = 1,69$ ,  $k_2 = 1,6$ .

При этом

$$k = \begin{bmatrix} 1,18 & -0,42 & 0 \\ -0,32 & 1,15 & 0 \\ -0,19 & 0,33 & 1,06 \end{bmatrix}, \quad kR(\tau_0) = I$$

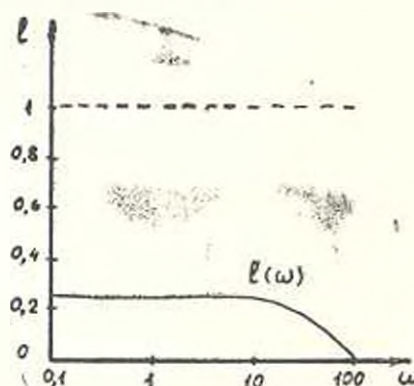


Рис. 3. Проверка условия устойчивости (12).

На рис. 3 приводится графическая проверка условия (15).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Doyle J. C., Stein G. Multivariable feedback design: concepts for a classical/modern synthesis // IEEE Trans. Auto. Contr. — 1984. — V. 29 № 12. — P. 1069–1075.
2. Вогводин В. В. Линейная алгебра. — М.: Наука, 1980. — 400 с.
3. Лоусон Ч., Хенсон Ч. Численное решение задач методом наименьших квадратов. — М.: Наука, 1986. — 232 с.
4. Астроледящие системы / Под ред. Б. К. Чемоладова. — М.: Машиностроение, 1977. — 304 с.
5. Чимшикян С. Е. Проектирование робастных многосвязных САР принцип нормальной доминантности // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками: Межиуз. сб. — Новосибирск, 1988. — С. 98–104.

ЕрПН

10. 11. 1990

УДК 622.691.4

П. А. МАТЕВОСЯН, А. Л. ОГАНИСЯН, Э. С. САФАРЯН

# ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ РАБОТЫ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Работа посвящена оптимизации режима работы КС по критерию минимума энергетических затрат. Приведены математическая модель и результаты реализации задачи оптимизации работы КС и режиме оперативного управления с помощью микро-ЭВМ. Для реализации задачи применены программа НЕЛСИ СМ нелинейного программирования. Приводится пример.

Библиогр.: 5 назв.

Աշխատանքը նվիրված է ճնշակային կայանների աշխատանքային ռեժիմի օպտիմալ կառավարման խնդրին բառ էներգետիկական ծախսերի նվազագույն լինելու շահանքով: Քերված են մաթեմատիկական նմաներ և ճնշակային կայանի աշխատանքը միկրո-էՎՄ-ի պոստգրամմով օպտիմալ ղարկներով խնդրի արդյունքները անմիջական կառավարման ռեժիմով: Խնդրի իրագործման համար կիրառված է պրոգրամմա ճնշակային ծրագրավորման ՆԵԼՍԻ ՄՄ ծրագրերը: Բերված են օրինակներ:

В газоперекачивающих агрегатах (ГПА) компрессорных станций (КС) газотранспортной системы (ГТС) Союза расходуется 10...12% от транспортируемого газа. Оптимизация режима работы КС, как показывает практика [1, 2], может дать экономию порядка 1...3% от сжигаемого на КС газа. Проблеме оптимизации режимов работы КС посвящен ряд работ [3, 4]. В отличие от известных работ в настоящей статье приведены результаты разработок математической модели и алгоритма реализации задачи оптимизации режимов работы КС, оснащенных газотурбинными нагнетателями, при оперативном управлении с помощью микро-ЭВМ.

Оптимизация режима работы КС сводится к рациональному перераспределению изменяемого во времени потока газа, транспортируемого через КС между ГПА, с учетом их КПД, а также температуры транспортируемого газа, его химического состава, давления на входе и выходе КС с целью минимизации энергетических затрат.

Целевая функция математической модели рассматриваемой задачи оптимизации может быть представлена в виде

$$A^{КС} = \sum_{i=1}^n A_i^{ГПА} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{102} \frac{K_i}{K_i - 1} zRT^{*} q_i (e^{(K_i - 1)K_i T_i^{*nGA}} - 1) + A^{мех} = \min, \quad (1)$$

Кроме того, математическая модель включает ограничения в виде балансового уравнения

$$\sum_{i=1}^n q_i = Q \quad (2)$$

и неравенств

$$q_{i, \min} \leq q_i \leq q_{i, \max} \quad (3)$$

где  $Q$  — поток газа, пропускаемого через КС,  $\text{кг/с}$ ;  $M$  — число ГПА и КС;  $шт$ ;  $q_i$  — поток газа, транспортируемый через  $i$ -ый ГПА,  $\text{кг/с}$ ;  $\eta_i^{\text{пол}}$  — полнотропический КПД  $i$ -го ГПА;  $\varepsilon = P^{\text{н}}/P^{\text{в}}$  — степень повышения давления газа на КС;  $P^{\text{н}}$  — давление нагнетания,  $\text{МПа}$ ;  $P^{\text{в}}$  — давление газа на входе в КС,  $\text{МПа}$ ;  $T^{\text{в}}$  — температура газа на входе в КС,  $\text{К}$ ;  $z$  — коэффициент сжимаемости газа;  $K$  — коэффициент адиабаты;  $N_i^{\text{ГПА}}$  — мощность расходуемая на  $i$ -ом ГПА,  $\text{кВт}$ ;  $N^{\text{мех}}$  — механические потери в ГПА,  $\text{кВт}$ ;  $R$  — газовая постоянная,  $\text{кг} \cdot \text{м} / \text{кг} \cdot \text{К}$ .

Несмотря на то, что КС оснащаются одинаковыми газотурбинными газоперекачивающими агрегатами, их КПД могут отличаться по причине неидентичности изготовления, из-за различных засорений в процессе эксплуатации, износа и других факторов. Анализ газодинамических характеристик нагнетателей различного типа показывает, что характеристика  $\eta_i^{\text{пол}}(q)$  существенно зависит от технического состояния агрегатов [5].

При реализации задачи на микро-ЭВМ, значения  $\eta_i^{\text{пол}}$  могут быть получены путем снятия характеристик с действующих ГПА [2] и аппроксимированы полиномом вида

$$\eta_i^{\text{пол}} = a q_i^2 + b q_i + c, \quad (4)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — коэффициенты аппроксимации.

В рассматриваемой задаче параметры  $Q$ ,  $P^{\text{н}}$ ,  $P^{\text{в}}$ ,  $T^{\text{в}}$ ,  $z$ ,  $R$  и  $K$  с течением времени могут изменяться и непосредственно вводиться в ЭВМ с пульта дисплея оператором. Рассматриваемая задача оптимизации (1)–(4) относится к классу многомерных задач нелинейного программирования. Для реализации математической модели (1)–(4) была использована программа оптимизации, входящая в пакет прикладных нелинейных программ ЭВМ типа СМ-4.

В результате оптимизационного расчета для каждого ГПА устанавливаются величины потоков газа, при которых КС будет затрачивать минимальное количество топлива при заданных условиях.

В качестве примера была рассмотрена КС, содержащая три рабочих агрегата типа ГТК-16. Исходная информация:  $P^{\text{н}} = 7,5 \text{ МПа}$ ,  $P^{\text{в}} = 5,5 \text{ МПа}$ ,  $\varepsilon = 0,6$ ,  $T^{\text{в}} = 290 \text{ К}$ ,  $z = 0,9$ ,  $R = 49 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{кг} \cdot \text{К}$ ,  $Q = 777 \text{ кг/с}$ ,  $K = 1,3$ ,  $N^{\text{мех}} = 150 \text{ кВт}$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = -0,0144$ ,  $\alpha_3 = -0,0146$ ,  $b_1 = b_2 = 0,2045$ ,  $b_3 = 0,2042$ ,  $c_1 = c_2 = 0,094$ ,  $c_3 = 0,092$ . Кроме того, известно  $200 \leq q_i \leq 400$ . В результате решения задачи (1)–(4) были получены следующие потоки газа:  $q_1 = q_2 = 284,85 \text{ кг/с}$ ,  $q_3 = 207,3 \text{ кг/с}$  и соответственно, затрачиваемые на компримирование газа мощности:  $N_1 = N_2 = 14791,2 \text{ кВт}$ ,  $N_3 = 10849,2 \text{ кВт}$ ,  $N_{\text{опт}}^{\text{КС}} = 40431,6 \text{ кВт}$ . С целью сопоставления был рассмотрен вариант одинаковой загрузки

ГПА. При этом мощность составила  $N_1 = N_2 = 13469,1 \text{ кВт}$ ,  $N_3 = 13555,7 \text{ кВт}$ ,  $N_4^{KC} = 40493,9 \text{ кВт}$ . Разность мощностей составит

$$\Delta N = N_4^{KC} - N_{опт}^{KC} = 62,3 \text{ кВт}.$$

При изменении  $\gamma_{обл}$  до 0,8 ожидаемый годовой экономический эффект на одной КС увеличивается до 21 тыс. рубл. В случае, если ЭВМ одновременно обслуживает 5 КС одного МГ, то затраты на ЭВМ окупятся за 2 месяца ее эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жидкова М. А. Переходные процессы в магистральных газопроводах.—Киев: Наукова Думка, 1979.—256 с.
2. Леонтьев Е. В., Цигельников Е. В. Изменение газодинамических характеристик ЦКМ в процессе эксплуатации // Сб.: «Труды ВНИИГаза», 1987.—С. 27—30.
3. Бобровский С. А. и др. Трубопроводный транспорт газа.—М.: Наука, 1976.—495 с.
4. Добыча, подготовка и транспорт природного газа и конденсата: Спр. рук. / Под ред. А. С. Коротаева в 2-х томах.—1984.—Т. 1, 360 с.—Т. 2.—288 с.
5. Инструкции по определению производительности, мощности и затрат топливного газа для ГПА с газотурбинным приводом.—М.: ВНИИГаз, 1984.—21 с.

ЕрНИ

25. X. 1989

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 3, 1991, с. 133—136

## НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 621.317.33

М. Г. АЗАРЯН

### ВЧ—МЕТОД АБСОЛЮТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОНИКИ

Основываясь на особенностях протекания ВЧ-токов, наведенных в исследуемый образец с помощью бесконтактного ВЧ-зонда, предложен метод абсолютного определения локального удельного сопротивления в высокоомных материалах электроники, использующий частотно-модулированный ВЧ-сигнал. Метод позволяет избежать ограничений, присущих описанной технике ВЧ-зонда.

Ил. 1. Библиогр.: 6 назв.

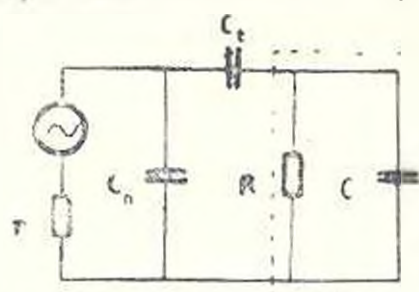
Հիմնվելով անհայտ  $R_z$ -զոնդով օգտագործվող նմուշներում մակաձված  $R_z$ -հասանքների տեսակի լուրահատկությունների վրա՝ առաջարկված է էլեկտրոնային տեխնիկայի բարձրագույն մակարդում տեղային տեսակարար դիմադրության որոշման բացարձակ մեթոդ, որում օգտագործվում է անալոգիանային մոդուլացված  $R_z$ -ազդանշան, Մեթոդը թույլ է տալիս խուսափել առանձնահատկություններից, որոնք բնորոշ են  $R_z$ -զոնդի օգտագործման հայտնի տեխնիկային:

Целью работы является предложить способ, который, используя идею наведенных ВЧ-токов [1—4], позволит бы, увеличив локаль-



ность, расширить диапазон измеряемых абсолютным образом удельных сопротивлений  $\rho$  хотя бы в сторону больших сопротивлений и предполагал возможность автоматизации процесса измерений.

Рассмотрим систему, содержащую коаксиальный ВЧ-емкостной зонд, подключенный через измерительное сопротивление  $r$  к ВЧ-генератору, причем открытый торец (предварительно отшлифованный) такого зонда отделен зазором  $h$  от поверхности исследуемого образца (ИО) и образует переходную емкость  $C_t$ . Эквивалентная схема такой системы представлена на рисунке. Здесь  $C_n$  — паразитная емкость коаксиальных соединительных кабелей и зонда,  $C_s$  — емкость связи,  $R$  — искомое сопротивление,  $C$  — емкость локальной области ИО,  $r$  — измерительное сопротивление. Значение  $C_t$  определяется из выражения  $C_t = \epsilon_0/L \cdot 4h$ , где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость вещества зазора



Рис

между зондом и ИО,  $d$  — диаметр центрального зонда

Согласно [1-4]

$$R = \rho/2d, \quad C = 2d\epsilon_m\epsilon_{\text{ИО}} \quad (1)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление ИО,  $\epsilon_m$  — диэлектрическая проницаемость ИО. Это равенство выполняется при  $d/D \ll 1$ , где  $D$  — внутренний диаметр внешнего электрода зонда.

На рисунке пунктиром отмечена эквивалентная схема локальной области ИО. В случае стационарности для импеданса нагружающего ВЧ-генератор можно записать [5]:

$$z_{\text{наг}} = (r + x_i^2 R / (R^2 + x^2)) + i(x_i^2 - x^2 x / (R^2 + x^2)),$$

где  $x_i = 1/\omega C_i$ ,  $x = 1/\omega C$ ,  $x_n = 1/\omega C_n$  — соответствующие реактивные сопротивления,  $\omega$  — круговая частота сигнала ГВЧ.

Комплексное напряжение  $U$  определяется из выражения  $U = \text{Re}\{U_0 \exp(i\omega t)\}$ , а ток —

$$I(t) = U_0 \cos(\omega t - \arctg \Phi) / [(r + x_i^2 R / (R^2 + x^2)) (1 + \Phi^2)^{1/2}], \quad (2)$$

где  $\Phi = (x_i^2 - x^2 x / (R^2 + x^2)) / (r + x_i^2 R / (R^2 + x^2))$ .

Воспользовавшись (1), оценим параметр  $\Phi^2$  в зависимости от  $\omega$ ,  $\rho$ ,  $C_n$  и  $C_t$ . Для GaAs ( $\epsilon_m = 13,1$ ) при  $\omega = 250 \cdot 10^6$  Гц,  $h = 5 \cdot 10^{-4}$  м,  $d = 20 \cdot 10^{-6}$  м,  $\epsilon = 11$ ,  $C_n = 20 \cdot 10^{-12}$  Ф для  $\rho \geq 20$  Ом·м —  $\Phi^2 < 7,4 \cdot 10^{-2}$ , а для Si ( $\epsilon_m = 11,9$ ) при тех же условиях —  $\Phi^2 < 9 \cdot 10^{-2}$ , т. е. значением  $\Phi^2$  в (2) можно пренебречь. Тогда

$$I(t) = U_0 \cos(\omega t - \arctg \Phi) (r + x_i^2 R / (R^2 + x^2)), \quad (3)$$

Это выражение также можно упростить, т. к. при  $r = 10$  Ом для  $\rho \leq 20 \cdot 10^3$  Ом·м  $r$  меньше  $x_i^2 R / (R^2 + x^2)$  в 17,3 раза. Таким образом, в диапазоне  $20 \dots 20 \cdot 10^3$  Ом·м (3) можно заменить выражением

$$I(t) = |U_0 R C_i^2 \omega^2 + (U_0/R)(C_i/C)^2| \cos(\omega t - \psi), \quad (4)$$

где  $\psi_0 = \arctg \Phi$ .

Введем в (4) следующие обозначения:

$$U_0 R C_i^2 = B, \quad (U_0/R)(C_i/C)^2 = P, \quad P\omega_0^2 + P = \Sigma_m.$$

Тогда

$$I(t) = \Sigma_m \cos(\omega t - \psi). \quad (5)$$

Заметим, что в (5) функция  $\psi$  зависит от времени. Однако, относительно первого слагаемого угла  $(\omega t - \psi)$  значению  $\psi$  меняется по времени медленнее (в  $10^3$  раз) и при этом  $0 \leq \Phi \leq 2 \cdot 10^{-1}$ , поэтому  $\psi$  практически можно считать постоянной.

Пусть сигнал ВЧ-генератора частично-модулирован. Как известно [6], если имеется некоторый сигнал (5), а мгновенная частота равна

$$\omega t = \omega_0 + \Delta\omega \cos(\theta t), \quad (6)$$

где  $\Delta\omega$  — девиация частоты, то спектр при  $m = \Delta\omega/\theta \ll 1$  можно записать

$$I_{\omega\omega}(t) = P \cos(\omega_0 t + mP/2) \cos(\omega_0 + \theta)t - (mP/2 \cos(\omega_0 - \theta)t + \\ + B\omega_0^2 \cos \omega_0 t - (mB\omega_0^2/2) \cos(\omega_0 + \theta)t - (mB\omega_0^2/2) \cos(\omega_0 - \theta)t.$$

Согласно (6) получим

$$I_{\omega\omega} = [P + B\omega_0^2(1 + k/2)] \cos \omega_0 t + [mp/2 + mB\omega_0^2(1/2 + k^2/2 + \\ + k/m)] \cos(\omega_0 + \theta)t + [-mp/2 + mB\omega_0^2(k/m - 1/2 - k^2/B)] \cos(\omega_0 - \theta)t + \\ + [B\omega_0^2 k^2/4(1 + 2m/k)] \cos(\omega_0 + 2\theta)t + \\ + [B\omega_0^2 k^2/4(1 - 2m/k)] \cos(\omega_0 - 2\theta)t + (mB\omega_0^2 k^2/8) \cos(\omega_0 + 3\theta)t - \\ - (mB\omega_0^2 k^2/8) \cos(\omega_0 - 3\theta)t,$$

где  $k = \Delta\omega/\omega_0$ .

Введем обозначения для амплитуд каждого члена полученного ряда:

$$A_1 = P + B\omega_0^2(1 + k/2), \quad A_2 = mp/2 + mB\omega_0^2(1/2 + k^2/2 + k/m), \\ A_3 = -mp/2 + mB\omega_0^2(k/m - 1/2 - k^2/B), \quad A_4 = B\omega_0^2 k^2/4(1 + 2m/k), \\ A_5 = B\omega_0^2 k^2/4(1 - 2m/k), \quad A_6 = mB\omega_0^2 k^2/8, \quad A_7 = -mB\omega_0^2 k^2/8,$$

тогда

$$I_{\omega\omega} = A_1 \cos(\omega_0 t) + A_2 \cos(\omega_0 + \theta)t + A_3 \cos(\omega_0 - \theta)t + \\ + A_4 \cos(\omega_0 + 2\theta)t + A_5 \cos(\omega_0 - 2\theta)t + A_6 \cos(\omega_0 + 3\theta)t + \\ + A_7 \cos(\omega_0 - 3\theta)t.$$

Легко заметить, что  $A_2 + A_3 = 2\omega_0^2 Bk$ ,  $A_4 + A_5 = \omega_0^2 Bk^2/2$ , тогда  $(A_2 + A_3)/(A_4 + A_5) = B\omega_0^2$  и  $A_1 = (A_2 + A_4)(4 - (A_2 + A_3)^2/(A_4 + A_5)^2) = P$ .

С учетом (2) окончательно запишем

$$\rho = [2d(A_1 + A_2)^2] / 8(A_1 + A_2)(U_0 C_1^2 \omega_0^2)$$

или

$$\rho = [2dU_0 C_1^2 \omega_0^2] [A_1 - (A_2 + A_3) + (A_2 + A_3)^2 / (A_1 + A_2) 8].$$

Таким образом, получены выражения, в левой части которых находится искомое удельное сопротивление, а в правой—измеряемые величины  $A, U_0, \omega_0, d$  и с помощью которых можно найти  $C$

$$C = [2U_0 C_1^2 \omega_0^2 (A_2 + A_3)] (2(A_1 + A_2) / (A_2 + A_3) \times \\ \times [A_1 - (A_2 + A_3) + (A_2 + A_3)^2 / (A_1 + A_2) 8])^{1/2}.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брайахт, Ганк. Бесконтактный метод измерения местного удельного сопротивления полупроводниковых материалов // Приборы для научных измерений.—1965.—№ 11.—С. 93—97.
2. Ягудин Г. Х. Бесконтактное измерение удельного сопротивления полупроводниковых образцов произвольной геометрии // Электронная техника.—1967.—Сер. II, вып. 2.—С. 129—139.
3. Миямото, Нисидзава. Бесконтактный метод измерения удельного сопротивления пластинок полупроводниковых материалов // Приборы для научных исследований.—1967.—№ 3.—С. 49—55.
4. Хольм Р. Электрические контакты.—М.: Изд-во ни. лит., 1961.—464 с.
5. Бонч-Бруевич Л. М. Радиозлектроника в экспериментальной физике.—М.: Наука, 1966.—766 с.
6. Баскаков С. Н. Радиотехнические цепи и сигналы.—М.: Высш. школа, 1988—448 с.

ИРФЭ АН РА

25. XII. 1989

Изв. АН Армении (сер. ГН), т. XLIV, № 3, 1991, с. 136—141

ГИДРАВЛИКА

УДК 532.546

Э. К. МУРАДЯН

### ФИЛЬТРАЦИЯ В МНОГОСЛОЙНОЙ ТОЛЩЕ БЕЗ ИНФИЛЬТРАЦИИ ПРИ МАЛЫХ И БОЛЬШИХ ВРЕМЕНАХ ОТКАЧКИ ЧЕРЕЗ СКВАЖИНЫ ИЗ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

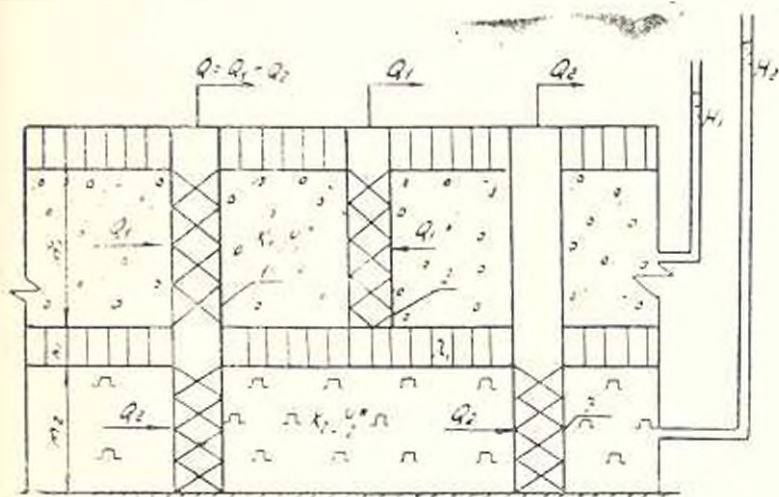
Рассматриваются задачи определения уровня подземных вод в двухслойной гидравлически связанной водоносной толще, разделенной слабопроницаемым слоем при различных режимах откачки из водоносных слоев в малых и больших временах без учета инфильтрации поверхностных стоков. Предлагаемые расчетные формулы будут использоваться для определения гидродинамических параметров и подсчета эксплуатационных запасов подземных вод.

Ил. 1. Библиогр. 3 назв.

Չիտարկվում է հիդրավիկական կապի մեջ գտնվող երկու ջրատար շերտերում, որոնք իրարից բաժանվում են մուլլ ջրաթափանցելիությամբ ունեցող շերտով, շերտմաների հաշվարկման խնդիրը, երբ ջրատուժը ջրատար շերտից կատարվում է տարբեր ուղիով մեծ և փոքր ժամանակներով, անտեսելով մակերևույթի ջրերի ներծծանքները, Առաջարկված բաժանվող կլիբրավեն հիդրոդինամիկական պարամետրերի և ստորերկրյա ջրերի պաշարների հաշվարկման համար:

Результаты решения задачи фильтрации для малых времен откачки будем использовать для определения гидродинамических параметров, а больших времен—для оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Для получения асимптотического решения будем использовать решения задачи фильтрации, представленные в виде отображающих функций по преобразованию Лапласа. Используя свойства параметра  $p$  преобразования Лапласа, при котором большим значениям времени  $t$  соответствуют малые значения  $p$  и наоборот, можно получить значения отображающих функций для больших и малых  $p$ , откуда с применением теоремы обращения найдем соответствующие решения для малых и больших времен [1, 3]. Для любых времен откачки из водоносных горизонтов в виде отображающих функций получены следующие решения:

задача 1—откачка воды через скважины осуществляется из двух напорных горизонтов с суммарным постоянным расходом  $Q$  [2] (рис.)



Рис

$$S_j(r, t) = \frac{2}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{\lambda t} \left\{ \frac{1}{1 + \alpha_T} [\Phi_{j1}(\lambda) K_0(\omega_1 r) - \Phi_{j2}(\lambda) K_0(\omega_2 r)] - \right. \\ \left. - \frac{\Delta H}{1 + \alpha_T} \left[ \Phi_{j3}(\lambda) \frac{K_0(\omega_1 r)}{K_0(\omega_1 r_0)} - \Phi_{j4}(\lambda) \frac{K_0(\omega_2 r)}{K_0(\omega_2 r_0)} \right] \right\} d\lambda \quad (j = 1, 2), \quad (1)$$

где  $K_0$  — функция Макдональда,



$$\begin{aligned}\Phi_{11}(\lambda) &= LM^-, \quad \Phi_{12}(\lambda) = LM^+, \quad \Phi_{13}(\lambda) = LM_1^+, \quad \Phi_{14} = LM_1^-, \\ \Phi_{22}(\lambda) &= LM_2^-, \quad \Phi_{23}(\lambda) = LM_2^+, \quad \Phi_{24}(\lambda) = LM_3^-, \quad \Phi_{24} = CM_3^-, \\ M^\mp &= A_2^0 - N\lambda \mp f(\lambda), \quad L = 0,5\lambda^{-1}f(\lambda)^{-1}, \\ M_1^\mp &= 2A^0 + a_T(N\lambda \pm A_1^0 \mp f(\lambda)), \quad M_2^\mp = A_2^0 + N\lambda \pm f(\lambda), \\ M_3^\mp &= A_3^0 + N\lambda \mp f(\lambda);\end{aligned}\quad (2)$$

задача 2—откачка воды через скважины осуществляется только из верхнего напорного горизонта с расходом  $Q_1$  [3] (рис.)

$$S_j^b(r, t) = \frac{1}{2\pi i} \cdot \frac{Q_1}{2\pi T_1} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{i\omega t} [\Phi_{j1}^b(\lambda) K_0(\omega_1 r) - \Phi_{j2}^b(\lambda) K_0(\omega_2 r)] d\lambda; \quad (3)$$

задача 3—откачка воды через скважины осуществляется только из нижнего напорного горизонта с постоянным расходом  $Q_2$  [3] (рис.)

$$S_i^n(r, t) = -\frac{1}{2\pi i} \cdot \frac{Q_2}{2\pi T_2} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{i\omega t} [\Phi_{i1}^n(\lambda) K_0(\omega_1 r) - \Phi_{i2}^n(\lambda) K_0(\omega_2 r)] d\lambda, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}\Phi_{11}^b(\lambda) &= LM_1^+, \quad \Phi_{12}^b(\lambda) = LM_1^-, \quad \Phi_{21}^b(\lambda) = \Phi_{22}^b(\lambda) = 2LM_{1b}, \\ \Phi_{11}^n(\lambda) &= \Phi_{12}^n(\lambda) = 2LM_{2n}, \quad \Phi_{21}^n(\lambda) = LM_2^-, \quad \Phi_{22}^n(\lambda) = LM_2^+, \\ M_1^\mp &= A_1^0 + N\lambda \mp f(\lambda), \quad M_{1b} = -B^0, \quad M_{2n} = A^0.\end{aligned}\quad (5)$$

В (2) и (5) имеются следующие обозначения:

$$\begin{aligned}A^0 &= a_2 a_1, \quad A_1^0 = A^0 - B^0, \quad B^0 = b_2 b_1, \quad N^0 = A^0 - 1, \quad a^n = A^0 + 1, \\ B_1^0 &= B^0 + 1, \quad f(\lambda) = [(A_2^0 + a\lambda)^2 - 4A^0\lambda(\lambda + B_1^0)]^{1/2}, \quad A_i^0 = A^0 + B^0, \\ \tau &= b_1 t, \quad \rho = \lambda b_1, \quad \omega_{1,2} = \left| \frac{b_1}{2a_2} (A_2^0 + a\lambda) \pm f(\lambda) \right|^{1/2}, \quad \alpha_i = \left( \frac{km}{\mu^*} \right) t, \quad (6)\end{aligned}$$

$$b_i = \frac{\lambda_1}{h_1 \gamma_i^*}, \quad S_i(r, t) = H_i(r, t) - H_{ic}, \quad A_3^0 = A^0 - B^0(1 + a_T),$$

$$a_T = T_2/T_1, \quad T = T_1 + T_2, \quad T_i = \left( \frac{km}{\mu^*} \right) t.$$

Здесь  $a_i$ —коэффициент пьезопроводности верхнего ( $i=1$ ) и нижнего ( $i=2$ ) напорных слоев;  $b_i$ —коэффициент претекания;  $S_i(r, t)$ —понижения уровня подземных вод на расстояние  $r$  от скважины в первом и втором напорных водоносных слоях в момент времени  $t$  ( $i=1, 2$ );  $H_i(r, t)$ —пьезометрические напоры для этих же слоев в течение отбора воды;  $H_{ic}$ —их значение в естественных условиях;  $m_i, h_i, \gamma_i^*, Q_i$ —соответственно мощности, коэффициенты фильтрации, упругой водоотдачи и расхода жидкости, поступающей в скважины для



водоносных слоев;  $h_1$ ,  $\lambda_1$  — мощность и коэффициент фильтрации раздельного слоя (рис.).

После построения асимптотических решений вблизи момента  $t = 0$  (т. е. для малых времен откачки) [1], расчетные формулы для вышеуказанных задач представлены в следующем виде:

$$1. S_{12}^*(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} R_{12}^{(1)}(r, t) - \frac{\Delta H}{T} r_1 R_{12}^{(2)}(r, t), \quad (7)$$

где

$$R_{12}^{(1)}(r, t) = -E_i\left(-\frac{r^2}{4a_1 t}\right) - \frac{A^0 B^0 b_1}{2(A^0 - 1)} \varphi_1\left(\frac{r^2}{A^0 a_1}, t\right),$$

$$R_{12}^{(2)}(r, t) = \alpha_T r_1^* \operatorname{Erf}\left(\sqrt{\frac{r'^2}{4a_1 t}}\right) - \frac{2A^0 + \alpha_T(A^0 - B^0)}{2(A^0 - 1)} b_1 r_2^* \varphi_1\left(\frac{r'^2}{A^0 a_1}, t\right),$$

$$R_{22}^{(1)}(r, t) = \frac{A^0 + B^0}{2(A^0 - 1)} b_1 \varphi_1\left(\frac{r^2}{a_1}, t\right) - E_i\left(-\frac{r^2}{4A^0 a_1 t}\right), \quad (8)$$

$$R_{22}^{(2)}(r, t) = \frac{A_1^0 r_1^*}{2(A^0 - 1)} b_1 \varphi_1\left(\frac{r'^2}{a_1}, t\right) - r_2^* \operatorname{Erf}\left(\sqrt{\frac{r'^2}{4A^0 a_1 t}}\right).$$

Для большого понижения уравнение (7) принимает вид

$$S_{12}(r_0, t) = \frac{Q}{4\pi T} R_{12}(r_0, t) \mp \frac{\Delta H}{T} T_{2,1}, \quad (9)$$

где

$$R_{12}(r_0, t) = -E_i\left(-\frac{r_0^2}{4A^0 a_1 t}\right) = \ln \frac{225 A^0 a_1 t}{r_0^2}; \quad (10)$$

$$2. S_{11}^*(r, t) = \frac{Q_1}{4\pi T_1} R_{11}^*(r_0, t), \quad (11)$$

где

$$R_{11}^*(r_0, t) = -E_i\left(-\frac{r_0^2}{4a_1 t}\right) + \frac{A^0}{N} b_1 \varphi_1\left(\frac{r^2}{A^0 a_1}, t\right), \quad (12)$$

$$R_{21}^*(r, t) = \frac{B}{N^0} b_1 \left| \varphi_1\left(\frac{r^2}{a_1}, t\right) - \varphi_1\left(\frac{r^2}{A^0 a_1}, t\right) \right|.$$

Для большого понижения имеем

$$S_{11}(r_0, t) = \frac{Q_1}{4\pi T_1} R_{11}^*(r_0, t), \quad (13)$$

где

$$R_{11}^*(r_0, t) = -E_i\left(-\frac{r_0^2}{4a_1 t}\right) = \ln \frac{225 a_1 t}{r_0^2};$$

$$3. S_{\Sigma}^n(r_0, t) = -\frac{Q_2}{4\pi T_0} R_{\Sigma}^n(r_0, t) \quad (i = 1, 2), \quad (14)$$

где

$$R_{\Sigma}^n(r_0, t) = A^0 b_1 \left| \varphi_1\left(\frac{r^2}{a_1}, t\right) - \varphi_1\left(\frac{r^2}{A^0 a_1}, t\right) \right|, \quad (15)$$

$$K_{\Sigma}^n(r, t) = \frac{A_1^0 b_1}{2A^0} \varphi_1\left(\frac{r^2}{a_1}, t\right) - E_i\left(\frac{r^2}{4A^0 a_1 t}\right).$$

Для большого понижения имеем

$$S_0^n(r_0, t) = \frac{Q_2}{4\pi T_0} R_0^n(r_0, t), \quad (16)$$

где

$$R_0^n(r_0, t) = -E_i\left(-\frac{r_0^2}{4A^0 a_1 t}\right) = \ln \frac{225A^0 a_1 t}{r_0^2}.$$

В (8), (10), (12) и (15) введены следующие обозначения:  $Ei$  — интегральная показательная функция;  $Erf$  — интеграл вероятности (функция ошибок Гаусса), [1];  $\varphi_1\left(\frac{r^2}{a_1}, t\right)$  — табулированные функции, значения которых даются в [1]:

$$\varphi_1\left(\frac{r^2}{a}, t\right) = \int_0^t \operatorname{Erf}\left(\sqrt{\frac{r^2}{4a u}}\right) du; \quad \varphi_1\left(\frac{r^2}{a_1}, t\right) = \int_0^t E_i\left(-\frac{r^2}{4a u}\right) du;$$

$$r' = r - r_0; \quad r_1^* = \sqrt{\frac{r}{r_0}}; \quad r'' = r + r_0 \sqrt{A^0}; \quad r_2^* = r_1^* \sqrt{A^0}.$$

Аналогично предыдущему после построения асимптотических решений вблизи момента  $t = \infty$  (т. е. для больших времен от качки) расчетные формулы для рассматриваемых задач представляются в виде

$$1. S_i(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} R_i(r, t) + \frac{\Delta H}{T} T_1(M_1 R_0(r, t) + U_1 \bar{\varphi}), \quad (17)$$

где

$$R_0(r, t) = -E_i\left(-\frac{r^2}{4a^0 t}\right), \quad M_1 = \frac{D_2^0}{2\beta^0}, \quad M_2 = \frac{D_4^0}{2\beta^0}, \quad U_1 = D_2 \frac{1}{\beta},$$

$$U_2 = -D_2 \frac{1}{\beta}, \quad D_1 = \frac{A^0(1 + \alpha_T)}{A^0 + B^0}, \quad D_2 = \frac{A^0 - \alpha_T B^0}{A^0 + B^0},$$

$$D_3 = \frac{B^0(1 + \alpha_T)}{A^0 + B^0}, \quad D_4 = \frac{A^0 - \alpha_T B^0}{A^0 + B^0},$$

$$\beta = K_0 \left( \sqrt{\frac{A_2^0 b_1 r_0^2}{A^0 a_1}} \right), \quad \beta = K_0 \left( \sqrt{\frac{A_2^0 b_1 r^2}{A^0 a_1}} \right).$$

Для максимального понижения имеем

$$S_{1,2}(r_0, t) = \frac{Q}{4\pi T} R_1(r_0, t) \pm \frac{\Delta H}{T} T_{2,1} \quad (i = 1, 2), \quad (18)$$

где

$$R_1(r_0, t) = \ln \frac{225a^* t}{r_0^2},$$

$$2. \quad S_{1,2}^0(r, t) = \frac{Q_2}{4\pi T_r} [M_1^0 R_1(r, t) + U_1^0] \quad (i = 1, 2), \quad (19)$$

где

$$M_{1,2}^0 = \frac{A^0}{A^0 + B^0}, \quad U_1^0 = -\frac{2A^0}{A^0 + B^0}, \quad U_2^0 = \frac{2B^0}{A^0 + B^0}, \quad a^* = \frac{T}{\mu^*},$$

$$\mu^* = \mu_1^* + \mu_2^*.$$

Для максимального понижения имеем

$$S_1^0(r_0, t) = \frac{Q}{4\pi T_2} R_1(r, t), \quad (20)$$

$$3. \quad S_2^0(r, t) = \frac{Q_1}{4\pi T_1} [M_1^0 R_1(r, t) + U_1^0], \quad (21)$$

где

$$M_{1,2}^0 = \frac{B^0}{A^0 + B^0}, \quad U_1^0 = \frac{2A^0}{A^0 + B^0}, \quad U_2^0 = -\frac{2B^0}{A^0 + B^0}.$$

Для максимального понижения имеем

$$S_2^0(r_0, t) = \frac{Q_1}{4\pi T_1} R_1(r_0, t). \quad (22)$$

Полученные расчетные формулы для фильтрации в многослойной толще при малых и больших откачки воды в различных режимах из водоносных горизонтов будут иметь большое применение при решении важных гидродинамических задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Казарян С. М. Водный обмен на фоне вертикального дренажа. — Ереван: Аластан, 1988 — 268 с.
2. Казарян С. М., Мурадян Э. К. Движение подземных вод к скважине в неоднородно-слоистом пласте без инфильтрации при откачке из двух слоев. — Изв. АН Армении. Сер. ТН. — 1991. — Т. XLIV, № 1. — С. 30—34.

АрмСХИ

4 IX 1990

УДК 532.57

А. А. ГУРГЕНЯН

# АКУСТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО С НЕПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Рассматривается задача о распространении пучков в электропроводящей жидкости с пузырьками газа в электрическом поле. Выведены уравнения коротких волн, которые в отличие от оптики, в акустических задачах независимы. Для равных и симметричных акустических зеркал получены уравнения модуляций и найдены их решения в виде Гауссовых пучков. По найденным разности фаз определяется пропускная способность акустического интерферометра Фабри-Перо. Получены ограничения для амплитуд начальных пучков, при котором имеет место явление бистабильности.

Ил. 2. Библиогр. 6 назв.

Ստանալիզում է հանդիպակաց փնջերի տարածման խնդիրը՝ գազի պղպուղների պարունակող էլեկտրազատարչիչ հեղուկում, որը գտնվում է փնջերի առանցքով ուղղված էլեկտրական դաշտում: Փրված են կարճ ալիքների հաճախումները, որոնք ի տարբերություն «պտիկայի» ձայնագիտական խնդիրներում իրարից անկախ են: Հաճախար և համաչափ փնջերը անդրադարձնող հայելիների համար ստացված են մոդուլյացիայի հաճախումները և դրանց են նրանց լուծումները Փաուսյան փնջերի տեսքով: Հստ գտնված փոխների տարբերության առաջարկվում է ստեղծել ձայնագիտական ինտերֆերոմետր և որոշվում է նրա քաղաքական գործակիցը: Ուղղակական փնջերի ամպլիտուդների համար ստացված են սահմանափակումներ, որոնց դեպքում տեղի ունի երկհաստատունության էրեկտներ:

В настоящее время большое внимание уделяется взаимодействию нелинейных волн и связи с созданием акустических приборов для генерации и излучения мощных волновых пучков. Особенно интересны резонаторы, в которых происходит взаимодействие пучков. Подобные устройства, имеющие многоволновой характер, изучаются в акустике и оптике, где нелинейность приводит к явлению бистабильности, имеющему важное значение для практики.

В настоящей работе исследуется влияние электрического поля на волновые движения непроводящей жидкости с пузырьками газа, находящимися в осевом электрическом поле при наличии встречных пучков. При этом наличие пузырьков приводит к дисперсии скорости звука и позволяет применять метод медленно-меняющихся амплитуд так, как было сделано в оптике [1]. Проводящая жидкость оказывается хорошим средством для усиления модуляций пучков и бистабильности, т. е. наличие скачка частоты происходит при весьма небольших амплитудах ультразвуковых волн, входящих в резонатор.

Как показано [2, 3], для анализа нелинейных волн в акустическом резонаторе, используя методы медленно изменяющегося профиля и усреднения уравнений, для быстропереодических колебаний можно

представить колебания в виде суперпозиции двух встречных волн, причем, в первом порядке можно считать уравнения пучков независимыми. Уравнения для встречных пучков берутся в форме уравнения коротких волн [4, 5].

Полагая, что проекция возмущенной скорости частицы на ось пучков:  $u = u_1(\tau_{1,2}, y, t) = u_2(\tau_{1,2}, y, t)$ , где  $\tau_{1,2}$  — каналы пучков, причем  $\tau_{1,2} = (\pm x + t)/H_1 - t$ ,  $y$  — координата по нормали к оси пучка, вдоль которого направлена ось  $x$  (отсчет  $x$  ведется от середины резонатора,  $x = \pm l$  координаты акустических зеркал),  $H_1$  — линейная скорость распространения волны, вышеуказанные уравнения для однородной среды можно записать в виде [4, 5].

$$\frac{\partial^2 u_{1,2}}{\partial t \partial \tau_{1,2}} - \frac{1}{2} L(u_{1,2}) = - \frac{1}{H_1} \frac{\partial}{\partial \tau_{1,2}} \times \\ \times \left\{ F u_{1,2} \frac{\partial u_{1,2}}{\partial \tau_{1,2}} + D \frac{\partial^2 u_{1,2}}{\partial \tau_{1,2}^2} + E \frac{\partial^3 u_{1,2}}{\partial \tau_{1,2}^3} \right\}. \quad (1)$$

Здесь  $F, D, E$  — коэффициенты нелинейности, диссипации и дисперсии, а  $L(u)$  дает оператор по поперечным координатам, причем при электрическом поле, направленном по оси  $x$ , имеет место симметрия

$$L(u) = \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial^2 \tau_1}{\partial y^2} \left( \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{k}{y} \frac{\partial}{\partial y} \right), \quad (2)$$

где  $y$  — радиальная координата в задаче с осевой симметрией  $k = 1$  или декартова координата для плоской задачи  $k = 0$ ,  $\alpha$  — частота невозмущенной волны,  $(\alpha\alpha_1, \alpha\alpha_2)$  — волновые векторы, которые в силу того, что ось пучка совпадает с осью  $x$  и волны близки к плоским, имеют координаты  $\alpha_1 \approx 1/H_1$ ,  $\alpha_2 \approx 0$ .

Система уравнений, описывающая движение поляризующей среды в однокоростном приближении и с учетом того, что диэлектрическая проницаемость среды зависит только от плотности, можно записать в виде [5, 6]

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \vec{v} = 0, \quad \rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \rho \nabla \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \frac{E^2}{8\pi} \right), \quad \text{rot } E = 0, \\ \tau(\pm E) = 0, \quad \rho = \rho_f (1 - \beta), \quad \frac{1 - \beta}{\rho_f \beta} = \text{const}, \quad \rho_f^{\frac{1}{n}} R^3 = \text{const}, \quad (3)$$

$$\rho_k = \rho - \frac{E^2}{8\pi} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} + \rho_f R \frac{d^4 R}{dt^4} + \rho_f \frac{4\nu}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{3}{2} \rho_f \left( \frac{dR}{dt} \right)^2,$$

где  $n$  — показатель адиабаты для пузырьков,  $\rho$  — плотность смеси,  $p$  — давление,  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $E$  — напряженность электрического поля,  $R$  и  $\beta$  — радиус и концентрация пузырьков,  $\rho_f$  и  $\rho_k$  — плотности жидкости носителя и газового пузырька.



Чтобы конкретизировать коэффициенты в (1) для данной среды, следует рассматривать характеристики уравнений (3). Как и в [4, 6], заменяя в уравнении (3)  $\partial/\partial t \rightarrow -x\partial$ ,  $\partial/\partial x \rightarrow n\partial$ ,  $i = c_n + v_n$  — скорость распространения волны по нормали,  $n$  — единичный вектор нормали к волне,  $\lambda$  — скачок производных по нормали к волне,  $v_n$  — нормальная скорость частицы, можно получить

$$\Gamma = \gamma + 1 = \frac{\alpha_0}{H_1} x^0 - \frac{2 - \beta_0}{2H_1^2} \frac{E_0^2}{8\pi\epsilon_0} \left[ \frac{\partial^2 x_0}{\partial \beta_0^2} - (2 - \beta_0) \frac{\partial^2 x_0}{\partial \beta_0^2} - \frac{2}{\epsilon_0} \left( \frac{\partial x_0}{\partial \beta_0} \right)^2 + \right. \\ \left. + 6(2 - \beta_0) \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial x_0}{\partial \beta_0} \left( \frac{\partial^2 x_0}{\partial \beta_0^2} - \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial x_0}{\partial \beta_0} \right) \right]. \quad (4)$$

$$D = - \frac{2\epsilon_0}{3\beta_0(1 - \beta_0)H_1}, \quad E = \frac{R_0^2}{6\beta_0(1 - \beta_0)H_1}, \quad x^0 = \frac{1}{\beta_0}.$$

В дальнейшем изучаются волны, которые мало отличаются от плоской, имеющей при  $f=0$  уравнений  $x=0$  и для простоты выбирается начальное электрическое поле по оси, т. е.  $E_{x_1} = E_{x_2} = 0$ ,  $E_{x_1} = E_0$ . Тогда коэффициенты (4) упрощаются.

Для узких пучков квазимонохроматических волн решение (1) можно искать в виде

$$u_{1,2} = \frac{1}{2} \left\{ u_{1,2}^{(0)} + u_{1,2}^{(1)} e^{i\theta_{1,2} - \gamma_1 t^2} + u_{1,2}^{(2)} e^{2i\theta_{1,2} - 2\gamma_2 t^2} + kc \right\} \quad (5)$$

и получить уравнения для гармоник  $u_{1,2}$ , которые после подстановки  $u_{1,2} = ae^{i\theta}$  принимают одинаковые по форме уравнения для обоих пучков, решение которых можно записать в виде [4, 5]

$$a = \frac{k}{f(\zeta)} \exp(-y^2 y_0^2 f^2), \quad \theta = \theta(\zeta) + \frac{1}{2R_0^2(\zeta)} y^2, \\ \zeta = \alpha\tau', \quad \tau' = \frac{-|x| + f}{H_1}, \quad K = \text{const.} \quad (6)$$

В приближении узких пучков для случая осевой симметрии в главном порядке для безразмерной ширины пучка получается

$$\frac{d^2 f}{d\tau'^2} = \frac{\tilde{\zeta}}{f^2}, \quad \tilde{\zeta} = - \frac{4K^2 \epsilon_0}{2} \gamma_1 + 4\epsilon_0 \mu^2, \quad \tilde{\zeta} = \frac{\Gamma^2 x \exp(-2\gamma_1 t^2)}{8H_1(9E^2 x^4 + \gamma_2 x^2 H_1^2)}, \\ \gamma_1 = \frac{1}{2\epsilon_0 H_1^2} \frac{\partial^2 x_1}{\partial x_2^2}, \quad \mu = \frac{H_1^2}{x^2 y_0^2}, \quad \gamma_1 = 3E\alpha^2 \tilde{\zeta}, \quad \gamma_2 = -\gamma_1 H_1 \tilde{\zeta}. \quad (7)$$

Решение (7) при граничных данных  $\tilde{\zeta}=0$ ,  $f=1$  записываем в следующем форме:

$$-\bar{\xi} = \frac{\sqrt{C' f^2 - \bar{\xi}}}{C'} - \frac{\sqrt{C' - \bar{\xi}}}{C'}, \quad (8)$$

$$C' = \left( \frac{1}{R_0^2} \frac{H_1^2}{z^2} \lambda + \frac{\gamma^2 K^2}{H_1^2 z^2} \right)^2 + \bar{\xi}.$$

Из полученного решения и (7) видно, что фокус  $f = 0$  будет при  $\bar{\xi} < 0$ , а последнее возможно при  $\lambda > 0$  и в предположении, что первое слагаемое в  $\bar{\xi}$  или нелинейность больше дифракции. Схождение пучка также будет при  $\lambda < 0$ ,  $\frac{1}{R_0^2} < 0$ , но фокус не получится.

Решение уравнения пучков для  $z(\tau)$  имеет вид

$$\frac{dz}{d\tau} = \frac{2}{z^2 z_1 f^2 y_0^2} \frac{\partial^2 z_1}{\partial z_1^2} - \frac{\gamma^2 K^2}{f^2}. \quad (9)$$

Допустим, что дифракция больше, чем нелинейность, тогда кривизна кривой  $f(\tau)$  больше нуля и имеется для пучков фокальное пятно

$$f_{\Phi, n}^2 = \frac{\bar{\xi}}{C'}, \quad z_{\Phi, n} = \sqrt{\frac{C' - \bar{\xi}}{C'}}. \quad (10)$$

Для того, чтобы имелся гладкий переход пучков при  $x = 0$ , значения  $z_{\Phi, n}$  для них должны совпадать, откуда следует

$$f^2 = \frac{\bar{\xi}}{C'} + x^2 \frac{C' x^2}{H_1^2}, \quad f_{\Phi}^2 = \frac{\bar{\xi}}{C'}. \quad (11)$$

Используя (11), решение уравнения (9) можно записать в виде при

$$\frac{1}{2} (z_1 - z_0) = -\frac{\pi}{H_1} l - \frac{\pi}{4} \frac{2A'}{H_1 f_0^2} \sqrt{\bar{\xi} H_1^2 C' z_1^2}. \quad (12)$$

Следуя работе [1], где рассмотрена круговая поляризация для звуковой волны, имеющей почти линейную поляризацию по оси  $x$  ( $v \parallel x$ ), можно вычислить коэффициент пропускной способности интерферометра Фабри-Перо, используя значение разности фаз (12) и определение коэффициента пропускной способности интерферометра Фабри-Перо

$$P = \frac{|U_1|^2 (1 - R)}{|K_0|^2}. \quad (13)$$

Используя (12) и свойства конфокальных зеркал, можно получить

$$P = \left[ 1 + \frac{4R}{(1 - R)^2} \sin^2 (k + F(x')) \right]^{-1}, \quad k = -\frac{2\pi l}{H_1}, \quad (14)$$

$$F(x') = -\frac{\pi}{4} \frac{2 + x'}{1 + x'}, \quad x' = \frac{\gamma_1 K^2}{z_1^2 |\lambda|}, \quad K = |U_1|.$$

Уравнения (13) и (14) дают конкретные значения для  $x'$ .

Ход пучков указан на рис. 1, где принято  $\epsilon > 0$ , что выполнено для сред  $\lambda < 0$ , например, для электропроводящей жидкости с пузырьками газа. При выполненных соотношениях нет фокусировки и обеспечена равномерная работа интерферометра.

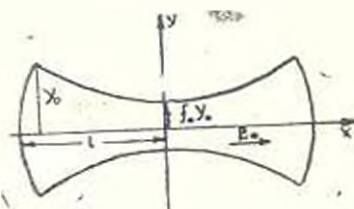


Рис. 1.

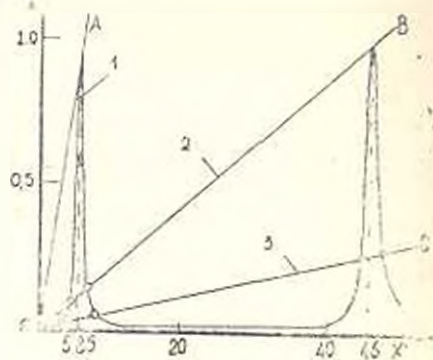


Рис. 2.

При больших  $K_0$  левая часть (1-1), являющаяся прямой линией (рис. 2), имеет несколько пересечений с функцией, получаемой правой частью, что приводит к возможным многим амплитудам в интерферометре, приводя к появлению бистабильности [1]. Для выяснения влияния электрического поля на явления бистабильности напишем  $x'$  в развернутой форме

$$x' = \frac{(1 - \beta_0)(\epsilon_2 - 1)}{4\beta_0 R_0^2} K^2, \quad (15)$$

где введены обозначения:  $\epsilon_2 = a_2^2/a_1^2$ ,  $a_1^2 = E_0^2/4\beta_0$ .

Из (14) и (15) следует, что при  $\epsilon_2 > 1$ ,  $x' < 1$  и для  $K$  получается меньшее значение при увеличении напряженности электрического поля, т. е. электрическое поле усиливает бистабильность интерферометра.

Таким образом, как и в [1], можно с помощью акустических зеркал, между которыми находится проводящая жидкость с пузырьками газа, получить прибор для преобразования частот и ограничения мощности.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Marburger J. H., Felber F. S. Theory of a lossless nonlinear Fabry-Perot interferometer // Phys. Rev. — 1978. — A, vol. 17, № 1. — P. 336—342.
2. Hunter J. K., Keller J. B. Weakly non linear high frequency waves // Comm. Pure Appl. Math. — 1983. — № 2, 36. — P. 547—563.
3. Choquet-Bruhat V. Ondes asymptotique et approches pour systemes d'equations aux derivees partielles nonlinear // J. Math. Pures et Appl. — 1969. — 48. — P. 117—158.
4. Багдоев А. Г., Петросян Л. Г. Распространение волн в микрополяризованной электропроводящей жидкости // Изв. АН АрмССР. Сер. Мех. — 1983. — Т. 36, № 5. — С. 3—16.
5. Багдоев А. Г., Гургенян А. А. Распространение волн в непроводящей магнитной жидкости // Магнитная гидродинамика. — 1986. — № 3. — С. 9—13.
6. Гогосов В. В., Налетова В. А., Шапошникова Г. А. Диффузионная и многокросовая модели двухфазных сред в электрическом поле // ПММ — 1980. — Т. 44, вып. 2. — С. 5—20.

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ի. Ռ. Հովսիփյան, Կադավրական փերյուժուՅյան կիրառումը և արդյունքների հետադարձումը կառուցվածքների և սեփեղդիական զոլմեթադի արդյունքների ծախագծման տարրերակների բնորոշյան մասանով | 97  |
| Ի. Ս. Միրնայան, Ս. Ա. Գավկյան, Խոշորագույն շենքերի դռան և պատույնի բացվածքները սեղեցի լայնական պատերում օգտագործելու ուղիքի որոշումը                                         | 102 |
| Յու. Ա. Կասպարյան, Ա. Գ. Մանուսարյան, Բ. Յու. Կասպարյան, Հայնսկային կառուցվածքի մոլեկուլային տարրի փերեային խնդրանքի փոփոխություն                                            | 106 |
| Ի. Հ. Ամիրխյան, Ս. Է. Մարտիրոսյան, Ի. Ի. Շուրպյանյան, Հեղուկական լամպարների ռեժիմների որոշումը բոլոր նրա էլեկտրական շղթաների սեղանների                                       | 112 |
| Ա. Վ. Ալեքսանյան, Հաստատուն հոսքերի ցածր լարման էլեկտրական ազդարարների կոնքի բարենպաստ Կախագծման գոտու որոշելու փերեները                                                     | 117 |
| Ս. Գ. Խաչիսյան, Ա. Ա. Տերեշենկո, Ն. Հ. Խաչիսյան, Տրանսպարանյան կաշանների թվի և տեղերի որոշումը տեղային լազոդական ցանցերում                                                   | 121 |
| Ս. Ե. Ջիրիկյան, Ս. Հ. Սեդրյան, Բազմակալ զինավիճակի սրբիկաններ անորոշությունների մոդելների կառուցումը բազմառանձիմ ափսոսան կառավարման լամպարների համար                         | 126 |
| Պ. Ա. Մարտիրոսյան, Ա. Ա. Հովհաննիսյան, Է. Ս. Սաֆարյան, Փյունայի զաղամուկների նշանակյին կաշանների ուղեղաանարյան սեղանի լազոդական կառավարում                                   | 131 |
| Մ. Հ. Արարյան, Հեղուկական տեխնիկայի կոնքի տեղային տեղափոխությունից դիմադրության բացարձակ լարման ԲՀ-մեթոդ                                                                     | 133 |
| Է. Ն. Սոբոլյան, Միանշարժ լազմաների տեղայինություն մեծ և փոքր մասնակցով բոլոր նշանակյին առանց կերպերից մեծով լարման ղեկարար                                                   | 136 |
| Ա. Ա. Կոպիկյան, Յարրի-Պեդրի մարնակապական ինտերֆերոմետրի զոլի պոլիպոլիկոն պարունակող և Հազարիկ հեղուկով էլեկտրական զաղում                                                     | 142 |

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| И. Р. Овакян, Применение морфологического аппарата и исследование результатов при выборе вариантов проектирования конструкций и технологических процессов | 97  |
| Р. С. Минисян, С. А. Даванян, Определение расчетных усилий в поперечной диафрагме крупнокапельных зданий, имеющих внутренние или оконные проемы           | 102 |
| Ю. Г. Гисларян, А. Г. Манукян, Б. Ю. Гисларян, Расчет конечного изгибания акустического элемента звукопоглощающих конструкций                             | 106 |
| Р. А. Амирханян, Р. Э. Мартиросян, Н. Н. Шарваханян, Определение режимов электрической системы по режимам ее электрических районов                        | 112 |
| А. В. Александровский, К определению зоны оптимального проектирования катушек низковольтных электромагнитных аппаратов постоянного тока                   | 117 |
| А. Г. Тарханян, А. А. Терещенко, Н. Г. Хачатрян, Определение числа и мест установки транспортных станций в локальных взаимосвязанных сетях                | 121 |
| С. Е. Чамчян, Е. А. Мерзян, Построение моделей неопределенностей многомерных динамических объектов для синтеза адаптивных САУ                             | 126 |
| Н. А. Митевская, А. А. Осипьян, Э. С. Сафарян, Оптимальное управление режимом работы компрессорной станции центрального газопровода                       | 131 |
| М. Г. Азарян, ВП-метод абсолютного измерения локального удельного сопротивления материалов электроники                                                    | 133 |
| Э. А. Мурадян, Фильтрация в многослойной толще без инфильтрации при малых и больших временах откачки через скважины из водоносных горизонтов              | 136 |
| А. А. Гургян, Акустический интерферометр Фабри-Перо с непроводящей жидкостью с пузырьками газа в электрическом поле                                       | 142 |