

Журнал издаётся с 5.01.1948 г.

Выходит 6 раз в год

Կ Մ Ր Յ Գ Ր Ա Վ Ա Ն Կ Ո Ն Ե Դ Ի Ա

Ի. Մ. Դադարյան (պատասխանատու խմբագիր), Վ. Է. Ալեքսևսկի,  
Ռ. Վ. Աբալյան, Ռ. Ա. Ղազարյան, Ս. Մ. Ղազարյան, Մ. Վ. Կասյան,  
Ս. Հ. Սահակյան, Յա. Լ. Սարգսյան, Մ. Գ. Ստակյան (տպատ. խմբ. թեզ.),  
Ջ. Կ. Յանիսյան (պատասխանատու քարտուղար), Վ. Ա. Խաչատրյան:

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ի. Ա. Մարտիրոսյան (ответственный редактор), Վ. В. Алексеевский,  
Р. В. Абалян, Р. А. Казарян, С. М. Казарян, М. В. Касьян,  
А. О. Савкин, Ю. А. Саркисян, М. Г. Сталин (зам. ответ редактора),  
Д. К. Степанян (ответственный секретарь), Л. С. Хачатурян

УДК 534

Р. Г. КЕОШКЕРЯН, М. Г. ХАЧИКЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ САМОРАЗОГРЕВА  
БИМОРФНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

Представлены методы и результаты экспериментального исследования параметров саморазогрева биморфных пьезоэлектрических приводов. Разработан стенд измерений. В качестве датчика температуры применен полупроводниковый термочувствительный элемент. Показаны зависимость температуры саморазогрева и времени переходного процесса от частоты возбуждения пьезопривода, а также зависимость температуры саморазогрева во времени.

На 3. Библиогр.: 2 назв.

Введение. В последние годы пьезоэлектрические приводы находят широкое применение в различных областях техники. В частности, они используются в качестве датчиков температуры, давления, деформации и т.д. В настоящее время пьезоэлектрические приводы находят применение в различных областях техники. В частности, они используются в качестве датчиков температуры, давления, деформации и т.д. В настоящее время пьезоэлектрические приводы находят применение в различных областях техники. В частности, они используются в качестве датчиков температуры, давления, деформации и т.д.

Биморфные пьезоэлектрические приводы широко применяются в качестве приводов микромашин, работающих в современном точном машиностроении, измерительной и оптоэлектронной технике. На их характеристики существенное влияние оказывают температурные поля саморазогрева, возникающие из-за выделенной энергии. В работе описаны методы и результаты экспериментального исследования параметров саморазогрева биморфных пьезопроводов.

В экспериментальных исследованиях характеристик нагреваемого тела широкое распространение имеет контактный метод измерений с помощью термометра [1]. Но вследствие того, что в электрических режимах работы пьезопровод совершает высокочастотные механические колебания, использование термометра является неэффективным, поскольку, контактируя с поверхностью пьезопровода, они вносят искажения в механические параметры последнего. Во избежание этого предложен контактный метод измерения, в котором в качестве датчика температуры использован миниатюрный полупроводниковый термочувствительный элемент, практически не оказывающий влияния на параметры исследуемого пьезопровода. Основными преимуществами полупроводниковых термочувствительных элементов являются малые габариты, возможность взаимозаменяемости и сравнительная дешевизна, позволяющая применять их в датчиках однократного использования.

При исследовании характеристик саморазогрева биморфных пьезопроводов применен полупроводниковый элемент, представляющий со-

бой кремниевую подложку размерами  $1,4 \times 1,2 \text{ мм}^2$ , на которой получены два отдельных  $p-n$  перехода. Принцип регистрации температуры заключается в том, что при поддержании постоянного тока через эти  $p-n$  переходы разность напряжений на них пропорциональна собственной температуре кремниевой подложки

$$\Delta U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_1}{I_2}, \quad (1)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$  — постоянная Больцмана,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд электрона,  $T$  — абсолютная температура кремниевой подложки,  $I_1$  и  $I_2$  — электрические токи через  $p-n$  переходы. При поддержании отношения  $I_1/I_2 = 3,2$  постоянной температура подложки определится из соотношения

$$T = \Delta U \cdot 10^{-4}, \quad (2)$$

т. е. с помощью вольтметра можно определять температуру нагретой кремниевой подложки. Температурная чувствительность  $p-n$  перехода по напряжению составляет приблизительно  $1,5 \text{ мВ/град}$ , что значительно выше чувствительности терморезисторов, работающих в одном и том же температурном диапазоне. Диапазон измеряемых температур примененного полупроводникового элемента достигает от  $-80$  до  $+150^\circ\text{C}$ . Для измерения температуры саморазогрева пьезопривода полупроводниковый элемент закрепляется на его поверхности клеем К.ПТ-30М, обладающим температурой разложения, равной  $200^\circ\text{C}$ , и высокими упругими свойствами.

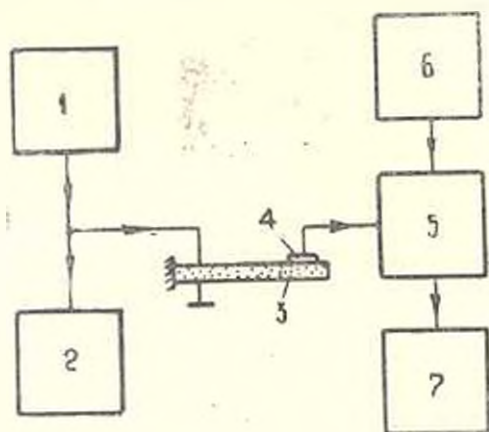


Рис. 1. Блок-схема стенда измерений

Задача экспериментального исследования состоит в определении следующих характеристик биморфного пьезопривода: зависимости величины установившейся температуры саморазогрева от частоты возбуждения электрического сигнала — температурно-частотная характеристика; изменение температуры саморазогрева во времени; зависимости времени переходного процесса от частоты электрического сигнала.

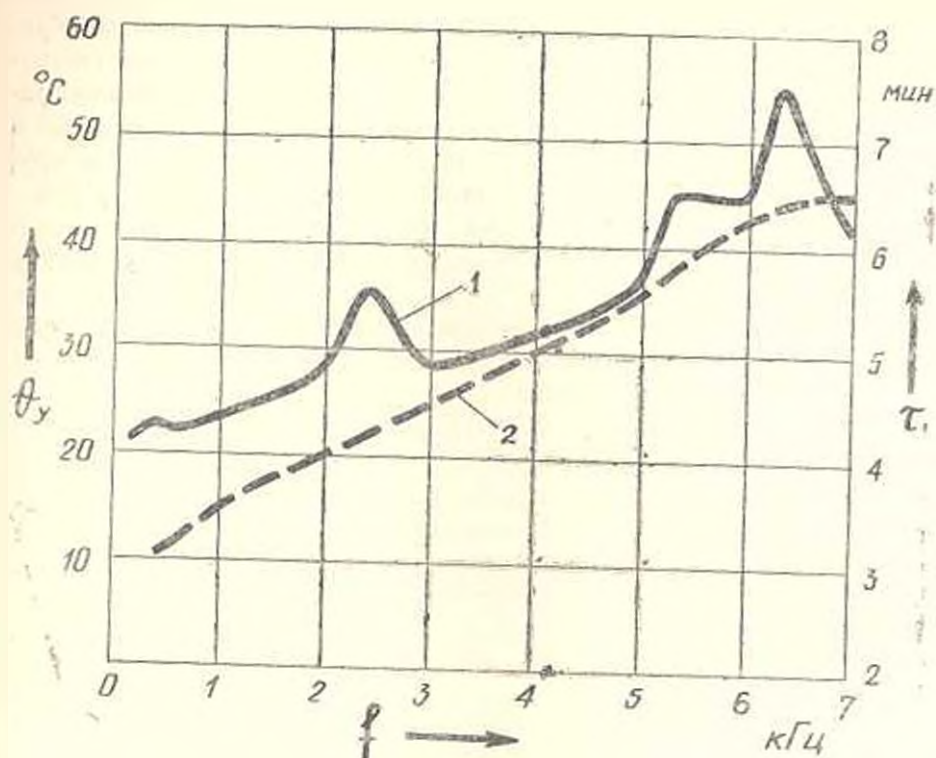


Рис. 2. Зависимости температуры саморазогрева (1) и времени переходного процесса температурного равновесия (2) биморфной пьезопластины от частоты возбуждения  $f$ .

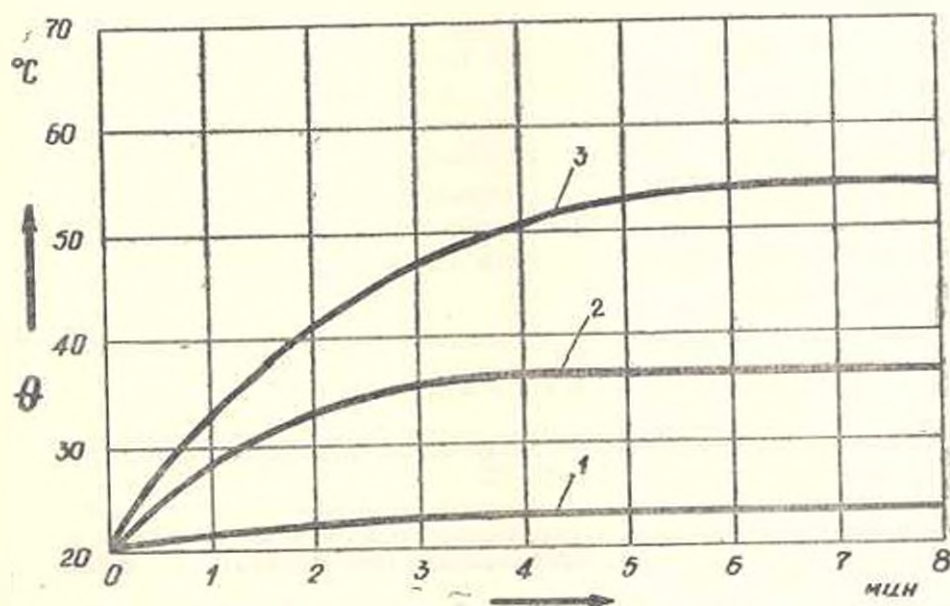


Рис. 3. Зависимость температуры саморазогрева биморфной пьезопластины от времени: 1 —  $f_1 = 0.355$  Гц, 2 —  $f_2 = 2.35$  Гц, 3 —  $f_3 = 6.2$  Гц.

нала. На рис. 1 приведена блок-схема стенда для исследования саморазогрева пьезопривода. Измерения производятся следующим образом: гармонический сигнал, вырабатываемый низкочастотным генератором 1 (ГЗ-56/1), откорректированный по напряжению осциллографом 2 (С1-65), подается на исследуемый пьезопривод, приводя его в колебательное движение. Наличие внутреннего трения при этом приводит к саморазогреву пьезопривода, регистрируемому полупроводниковым элементом 4. Электронный сигнал от полупроводникового элемента преобразуется электронной схемой 5 так, что показания вольтметра 7 (В7-22А) соответствует температуре саморазогрева пьезопривода и кельвинам. Показания вольтметра снимаются через определенные промежутки времени. Исследуемый пьезопривод представляет собой коническую закрепленную прямоугольную биморфную пластину из пьезокерамики ЦТС 19 размерами  $15 \times 37,5 \times 1,2$  мм. Биморфная пьезопластина возбуждается в диапазоне, включающем первые три резонансных частоты от 0,355 кГц до 7 кГц при напряжении  $U = 70$  В и коэффициенте теплоотдачи с окружающей средой  $\alpha = 5$  Вт/м<sup>2</sup>·град. Начальная температура пьезопластины равнялась окружающей среде — 20°C. При установившемся режиме температуры саморазогрева от времени показания вольтметра снимаются через интервалы  $\Delta t = 15, 30$  и 60 с. Поскольку в диапазоне от 0 до 60 с поведение функции  $\theta(t)$  оказалось монотонным, окантованным шаг по времени  $\Delta t$  принимался постоянным и равным 30 с. На рис. 2 представлена температурно-частотная характеристика (кривая 1) биморфной пьезопластины, из которой видно, что максимальные значения температуры саморазогрева соответствуют резонансным частотам возбуждения [2]. Это объясняется тем, что температура саморазогрева определяется величиной диссипации энергии в пьезоматериале, достигающей максимального значения на резонансных частотах. Зависимость времени  $t_p$  переходного процесса температурного равновесия от частоты  $f$  возбуждения (рис. 2, кривая 2) является монотонно-возрастающей функцией, т. е. температурно-частотная характеристика также возрастает. На рис. 3 показана зависимость температуры саморазогрева пьезопластины на первых трех резонансных частотах  $f_p = 0,355, 2,35$  и 6,2 кГц. Стационарный режим работы в зависимости от частоты достигается спустя 4—7 мин после включения питания пьезопривода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лелия Е. С., Новичкий Н. В. Электрические измерения неэлектрических величин. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 320 с.
2. Арутюнян М. Г., Кочикян А. В., Кешикян Р. Г. Исследование температурных полей саморазогрева пьезоэлектрических приводов и их воздействия на динамические характеристики // Вибротехника. — 1990. № 65 (1). — С. 15—51.

УДК 621.382.333

Г. Е. АПВАЗЯН, Г. С. БАБАЯН, А. Г. БАХШЕЦЯН

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТОК НА ОБРАЗОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ УПАКОВКИ В КРЕМНИИ

С помощью метода селективного травления исследовано влияние высокотемпературных обработок на образование окислительных дефектов упаковки в кремнии. Показано различие в плотности, размерах и распределении указанных дефектов на поверхности и в объеме образцов. Предложен механизм образования дефектов упаковки.

Наз. 4 Библиогр.: 5 назв.

Հետազոտված փափաղների մեթոդի օգտագործմամբ ևս ուսումնասիրվել է ջրածրի ճնշման ազդեցության ազդեցությունը սիլիցիումում օքսիդացման գործընթացների արտաքին և ներքին փոփոխության վրա: Ուսումնասիրվել է օքսիդի նյութի մակերևույթի վրա և ծավալում: Առաջարկվում է փափաղների առաջացման մեխանիզմը:

Окислительные дефекты упаковки (ОДУ), формирующиеся при высокотемпературных обработках, оказывают заметное влияние на электрофизические параметры интегральных схем и полупроводниковых приборов [1, 2]. Изучение этих дефектов позволяет целенаправленно воздействовать на процесс их образования и аннигиляции.

Цель настоящей работы—исследование влияния высокотемпературных обработок на образование и распределение ОДУ в объеме и на поверхности кремния. Исходными образцами служили пластины бездислокационного кремния с удельным сопротивлением 35 Ом·см (легирующая добавка—фосфор). Кремний ориентацией (111) был выращен методом Чохральского. Максимальная концентрация кислорода, определенная методом ИК-спектроскопии, составляла  $1,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Термообработка осуществлялась в различных средах, включая кислород, воздух, азот и в кислороде с хлорсодержащей добавкой (НС1). Температура обработок изменялась от 1000 до 1220°C.

Для выявления структурных дефектов использовался метод селективного травления поверхности сколов образцов и травителем Сиртля. Сколы изготавливались в кристаллографических направлениях  $\langle 110 \rangle$  с выходом на плоскости (111). Концентрация и линейный размер ОДУ определялись с помощью оптического микроскопа высокого разрешения. Ошибка в определении длины ОДУ составляла 0,5 мкм.

На рис. 1 представлен характерный вид ОДУ, выявляемых селективным травлением. Видно, что следы травления рассматриваемых дефектов имеют форму удлиненных канавок, пересекающих поверхность пластины по кристаллографическим направлениям  $\langle 110 \rangle$  и составляющих между собой угол 60°. Канавки лежат как в «компла-

парных», так и в «наклонных» плоскостях  $\{111\}$ , располагающихся под углом  $70^{\circ}32'$  к поверхности. Наряду с ОДУ в процессе термообработок возникают и другие дефекты, следы травления которых имеют вид плоскодонных треугольных ямок различных размеров (рис. 2). Эти фигуры травления интерпретируются как следы преципитационно-дислокационных комплексов, состоящих из преципитатов  $\text{SiO}_2$  ( $X \approx 2$ ) и выдавленных призматических дислокационных петель [3]. Непосредственно в окрестности ОДУ преципитационно-дислокационные комплексы отсутствуют, хотя в большом количестве образуются в соседних областях. Наблюдения показали, что концентрация отмеченных микродефектов хорошо коррелирует с плотностью ОДУ.

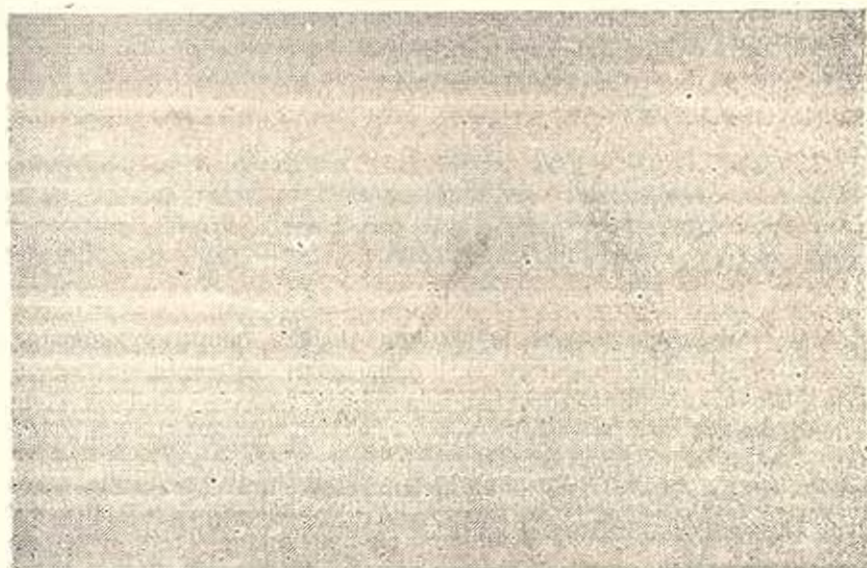


Рис. 1. Характерный вид ОДУ, выявляемых селективным травлением ( $\times 500$ ).

Макрокартина распределения термически наведенных дефектов в объеме кремния представлена на рис. 3, она отвечает сложному распределению ристовых свирл-дефектов, что, в свою очередь, отражает условия выращивания бездислокационного кремния [4]. При этом плотность объемных ОДУ на впитке свирла на несколько порядков выше, а их размер значительно меньше, чем в «пустой» прослойке. После наиболее продолжительной и высокотемпературной обработки ( $t = 144$  ч,  $T = 1220^{\circ}\text{C}$ ) средний размер ОДУ в областях их свирлевого распределения составил 55 мкм, плотность— $2 \cdot 10^4$  см $^{-2}$ . Концентрация изолированных преципитационно-дислокационных комплексов, разрешаемых с помощью селективного травления, достигла при этом  $5 \cdot 10^6$  см $^{-2}$ . В «пустой» прослойке выявляются только отдельные микродефекты с размером 80 мкм.

На рис. 4 приведена зависимость плотности объемных ОДУ на впитке свирла от продолжительности термообработки при  $1220^{\circ}\text{C}$ . Чем

длительнее процесс, тем больше увеличивается плотность ОДУ, причем скорость дефектообразования через некоторое время начинает уменьшаться. Замечено также, что плотность и размер объемных ОДУ практически не зависят от среды термообработки, но возрастают с увеличением температуры.

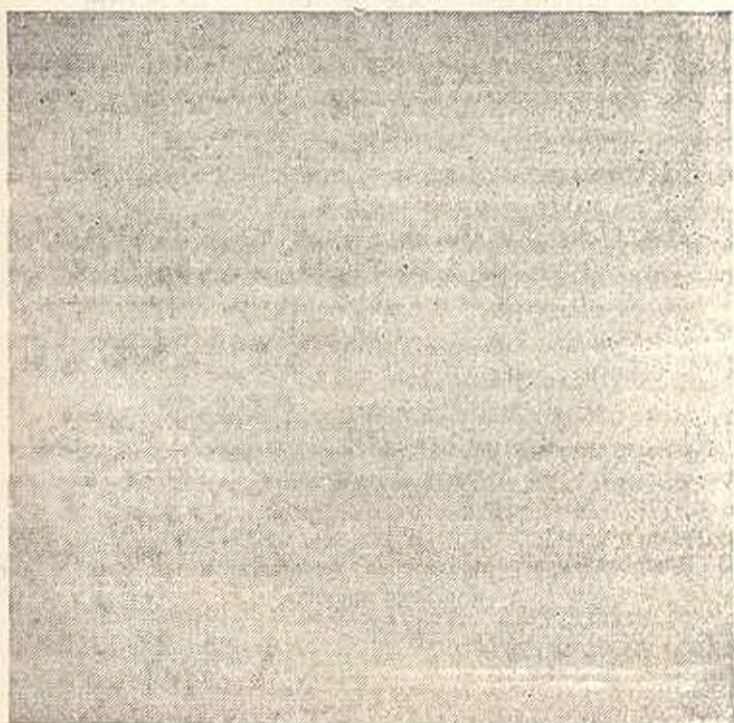


Рис. 2. Образование структурных дефектов в кремнии после термообработки (15).

Исследование же поверхностных ОДУ показало, что они имеют примерно одинаковый размер и сосредоточены в приповерхностном слое толщиной в несколько мкм. Плотность этих дефектов существенно зависит от качества механической подготовки поверхности пластины и изменяется в широком интервале (от  $10^1$  до  $10^5$  см<sup>-2</sup>). Формирование поверхностных ОДУ, в отличие от объемных, не связано с термовоздействием в чистом виде и интенсивное дефектообразование наблюдается в процессе термообработок в окислительной среде. При введении хлорсодержащей добавки в кислород образование ОДУ частично подавляется.

Согласно существующим представлениям, ОДУ являются дефектами внедренного типа и ограничены частичными сидящими дислокациями Франка. Зародыши этих дефектов образуются из избыточных междоузельных атомов кремния на некоторых напряженных центрах в объеме и на поверхности пластины [1—3].



Рис. 3. Макрокартина распределения термически наведенных дефектов в объеме кремния.

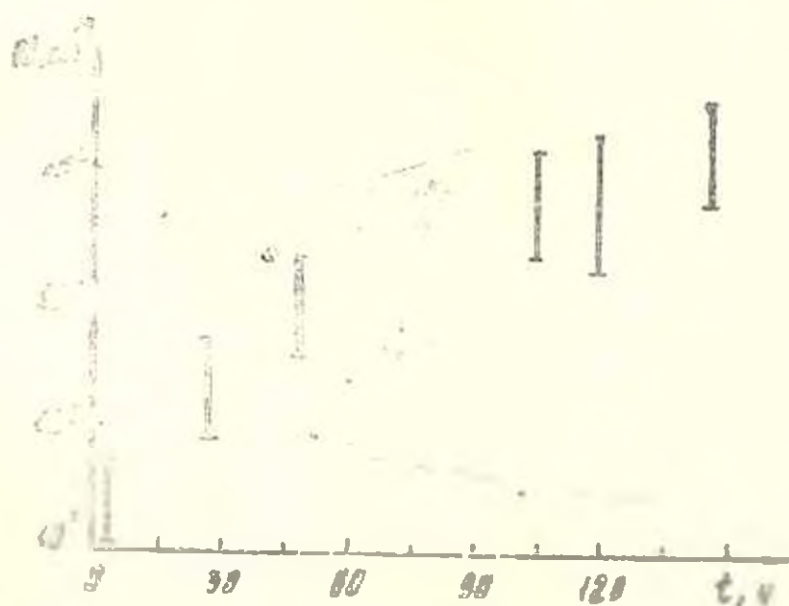


Рис. 4. Зависимость плотности объема ОДУ от продолжительности термообработки

Ярко выраженное склонение распределения объемных ОДУ указывает на участие в их образовании процессов диффузии. Известно, что при термообработках эти дефекты (А- и В-кластеры) являются центрами коагescенции междоузельных атомов растворенного кислорода и образования преципитатов  $\text{SiO}_2$  [2]. Вероятнее всего, окружающие  $\text{SiO}_2$  атомы кремния отталкиваются движущейся фазовой границей и вследствие этого вблизи границы частица-матрица возникает избыточная концентрация междоузельных атомов кремния. В итоге, испускаемые атомы образуют призматические дислокационные петли и дислокации Фрэнкла, содержащие ОДУ. В пользу описанного механизма свидетельствует также обнаруженная взаимосвязь между плотностью объемных ОДУ и концентрацией преципитационно-дислокационных комплексов. Рост плотности и размеров ОДУ возможен за счет повторной преципитации и поглощения междоузельных атомов дислокациями Фрэнкла. С увеличением продолжительности термообработок возрастают вероятность образования и концентрация частиц  $\text{SiO}_2$ .

Существенное различие между ОДУ на поверхности и в объеме кремния, по-видимому, связано с экстракцией междоузельных атомов кремния и кислорода из приповерхностного слоя в результате термовоздействий. Одновременно протекает конкурирующий процесс, т. е. увеличивается концентрация междоузельных атомов вследствие не полного окисления кремния и возникновения больших внутренних напряжений на границе  $\text{SiO}_2$ — $\text{Si}$  [5]. Большая подвижность образованных атомов приводит к их скоплению в локальных напряженных центрах, которыми являются механические нарушения. Здесь же, как показывает эксперимент, заглаживаются и растут поверхностные ОДУ. При введении хлоридсодержащей добавки в кислород на поверхности пластины образуется избыток хлоридов (атомы хлора активируются молекулами  $\text{HCl}$ ), что приводит к частичной аннигиляции ОДУ. Представленные на рис. 4 временные зависимости плотности и размеров ОДУ показывают, что зародышеобразование дефектов является динамическим процессом. Косвенным доказательством тому служит существование преципитационно-дислокационных комплексов различных размеров.

Таким образом, плотность, размер и характер распределения ОДУ зависят от структурного совершенства исходного кремния и режимов проведения термообработок. Появление ОДУ и сопутствующих им преципитационно-дислокационных комплексов можно объяснить генерацией междоузельных атомов кремния и кислорода. Разные условия протекания этого процесса на поверхности и в объеме кремния обуславливают различные характеристики объемных и поверхностных ОДУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рейс К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии: Пер. с англ./Под ред. С. И. Герина.—М.: Мир, 1984.—475 с.

2. Hu S. M. Defects in silicon substrate // J. Vac. Sci. Technol. — 1977. — V. 14. № 1. — P. 17—30.
3. Образование дислокаций в бездислокационном Si, подвергнутом геттерировочной термообработке // В. П. Алексин, Л. А. Игнатова, Ю. М. Литвинов и др. // Микроэлектроника. — 1985. — Вып. 5. — С. 415—419.
4. Шабоян С. А., Бахигян А. Г., Дюмазян С. Г. Влияние тепловых условий выращивания на совершенство кристаллической структуры бездислокационного кремния // Изв. АН АрмССР. Сер. Физика. — 1979. — № 4. — С. 144—146.
5. Айвазян Г. Е., Скалорцов А. М. Расчет внутренних напряжений в системе «слой-подложка» // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. — 1986. — Вып. 1. — С. 117—120.

ИППО «Тринэстор»

5. XI 1990

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 5—6, 1991, с. 216—222

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.762.621.91

С. Г. АГБАЛЯН, Г. А. АСАТЯН, Г. Г. МКРТЧЯН, Р. Г. САМВЕЛЯН, С. А. АСИЛА

### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЕЧЕННОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ЧУГУННОЙ СТРУЖКИ

Исследованы структура и механические свойства спеченных сталей из стального порошка, полученных из чугушной стружки методом содового рафинирования и из его смеси с железным порошком при различных сочетаниях. Установлено, что с увеличением содержания стального порошка прочность спеченных сплавов возрастает. Оптимальные механические свойства достигаются при соотношении 35:65. Механические свойства спеченных изделий ( $\Pi = 0\%$ ) достигаются при ВТМО ( $\tau_{\text{в}} = 1500 \text{ МПа}$ ), сочетающей экструзию и немедленную закалку с низким отпускком, при этом структура представляет собой бесструктурный мартенсит. Выявлено, что структура порошковых сталей полностью соответствует структурам стандартных сталей без каких-либо аномалий.

Ил. 4. Библиогр.: 6 назв.

Ստամբուլի քիմիական և ֆիզիկական հետազոտության ինստիտուտի և Երևանի փոշիների տարրեր հարաբերակցությանը խառնուրդից համալուծված պողպատների կառուցվածքը և մեխանիկական հատկությունները: Հիմնադրվել է, որ պողպատի փոշու քանակության ավելացման դեպքում եռակալված պողպատի ամրությունը բարձրանում է: Մեխանիկական հատկությունների բաժանումը արժեքը բաժանվում է բաղադրիչների 35:65 հարաբերության դեպքում: Նախադրված պողպատների ( $\Pi = 0\%$ ) առաջնությունը հատկությունները ստացվում են բարձր ճնշմամբ մշակման դեպքում ( $\tau_{\text{в}} = 1500 \text{ МПа}$ ), որն իր մեջ բնութագրում է սառնարանային (կոմպակտացիայի) և անմիջական միասին հետագա դանք միասնադաստի: Այս դեպքում ստացվում է խիստ մանր անեղնավոր մարտենսիտային միկրոկառուցվածք: Ազդեցություն է, որ մետաղափոշիներից ստացված պողպատների կառուցվածքը ամրոցությանը համապատասխանում է ստանդարտ հատկություններին առանց որևիպ փոփոխության:

Как известно, в стране отходы черных металлов в виде стружки превышают 9...10 млн тонн в год, в том числе чугушной стружки 2,0...2,5 млн тонн. Чугунная стружка по существу является почти готовым сырьем для порошковой металлургии и легко измельчается

в тонкодисперсный порошок. Проблема утилизации чугушной стружки методами порошковой металлургии путем ее рафинирования от природных примесей (6...8%) и механических загрязнений (2...4%), выпадаемых при сборе, хранении и транспортировке, посвящены работы [1, 2], а технология получения беспористых заготовок из стальных порошков методами экструзии приведена в [3].

Целью настоящей работы является исследование структуры и свойств спеченных сталей из стального порошка и из его смеси с железным порошком при различных сочетаниях. Химический состав стального порошка, полученного из чугушной стружки методом содового рафинирования, приведены в [2].



Рис. 1. Прочность на разрыв образцов, изготовленных из смеси стального и железного (ПЖ2М1) порошков: 1 — пористые (П-20%); 2, 3 — беспористые (П-0%).

Из стального порошка и его смеси с железным порошком двусторонним прессованием  $P = 500 \text{ МПа}$  изготавливали цилиндрические заготовки ( $\varnothing 30 \text{ мм}$ ,  $h = 50 \text{ мм}$ ) пористостью 25%, которые нагревали в защитной среде и экструдировали через коническую матрицу ( $2\alpha = 120^\circ$ ). На рис. 1 показана зависимость прочности спеченной стали от содержания стального порошка. Как видно, с увеличением количества стального порошка прочность образцов возрастает, при этом прочность беспористых образцов в 3—4 раза выше прочности пористых образцов. Столь существенное различие объясняется тем, что беспористые образцы получены экструзией по оптимальным режимам ( $T = 1100\text{--}1150^\circ\text{C}$ ,  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ с}^{-1}$ ,  $4 \leq l \leq 5$ ,  $2\alpha = 120^\circ$ ), рекомендованным в [4]. При этом использовалось условие, гарантирующее получение беспористых структур

$$l_{\text{кр}} \geq \exp \left[ \frac{m}{c} \left( 1 + f \frac{L}{P} \right)^{-1} \right],$$

где  $m = \frac{P_n}{\sigma_n}$ ;  $P_n$  — давление экструзии;  $\sigma_n$  — временное сопротивление металла на разрыв при температуре экструзии;  $c$  — коэффициент, учитывающий напряженное и деформированное состояния металла

при экструзии (для сплошной стали  $\epsilon = 1$ );  $k$  — коэффициент поверхностного трения металла,  $L$  — длина заготовки,  $D$  — диаметр контейнера (заготовки).

О целесообразности применения смеси стального и железного порошков для изготовления деталей машин свидетельствует кривая 3 (рис. 1), которая характеризует ударную вязкость. В зависимости от условий эксплуатации рекомендуется тот или иной выбор соотношений порошков, вплоть до 100%-го содержания стального порошка. Сравнивая кривые 1 и 2, необходимо отметить, что всегда надо ориентироваться на изготовление деталей с мелкокристаллической или безкристаллической структурой. Микроструктура образцов ферритная (рис. 2), а по составу — однородная. Структура экструдированной стали (рис. 2 б, г) практически беспористая.

Определенный интерес представляют механические свойства порошковых сталей, подвергнутых термической обработке. Как известно [5], спеченные углеродистые стали пористостью до 10% хорошо подвергаются закалке, при 10%  $\leq \Pi \leq 15\%$  удовлетворительно закаливаются, а свыше 15% — не принимают закалки. С-образные кривые и термокинетические диаграммы спеченной стали с увеличением пористости смещаются влево, а температура минимальной устойчивости переохлажденного аустенита — вверх. Например, минимальная устойчивость аустенита стандартной стали У8 соответствует температуре 530°C, а порошковой ( $\Pi = 20\%$ ) — 590°C. Время минимальной устойчивости аустенита уменьшается от 1,6 до 0,5 с, а общее время превращения — от 5,1 до 1,9 с. Структурные особенности оказывают сильное влияние и на кинетику бездиффузионного превращения аустенита. С увеличением пористости точка начала мартенситного превращения  $M_s$  повышается. Так, для стандартных сталей марок 45 и У8  $M_s = 380$  и 340°C, тогда как для порошковых сталей ( $\Pi = 20\%$ ) — соответственно  $M_s = 380$  и 320°C.

Смещение С-образных кривых и повышение значений  $M_s$  существенно затрудняют закалку пористых порошковых сталей. В связи с этим температуру закалки предусматривают на 60–120°C выше, чем для стандартных сталей, а содержание углерода берут на 0,1–0,3 мас. % больше. Все эти закономерности справедливы и для порошковой стали из стального и железного порошков.

Определенный интерес представляет термомеханическая обработка разработанных сталей. В этой связи термообработку изучали на беспористой стали, полученной экструзией. При этом процессы экструзии сочетались с высокотемпературной термомеханической обработкой (ВТМО). По существу экструзия и немедленная закалка (я воле) составляли процесс ВТМО. Некоторые результаты экспериментов представлены на рис. 3. В порядке сравнения приведены данные [6], иллюстрируемые кривой 3. При этом стандартная сталь марки СП60-4 (СП — сталь порошковая, 10–0,1 мас. % С, 4– $\Pi \leq 2\%$ ) подвергнута предварительной термической обработке (ПТМО), заключающейся в холодной пластической деформации (степень деформации  $\epsilon =$



Рис. 2. Микроструктуры образцов из стального (а, б) и из стального (35 мас. %) и железного (65 мас. %) порошков (в, г). а — пористая (П — 2 %), б — беспористая (ж. грунт), (X250)

50%), промежуточный отпуск, быстрый нагрев и закалку. После обработки наиболее устойчивые дефекты кристаллического строения, создаваемые при холодной пластической деформации, сохраняются при протекании последующих процессов и наследуются мартенситом.

Максимальный уровень прочностных свойств порошковых сталей, соответствующих уровню литых сталей, наблюдается при высоких степенях деформации (50–75%) и низкотемпературном отпуске при 300°C (кривая 3).

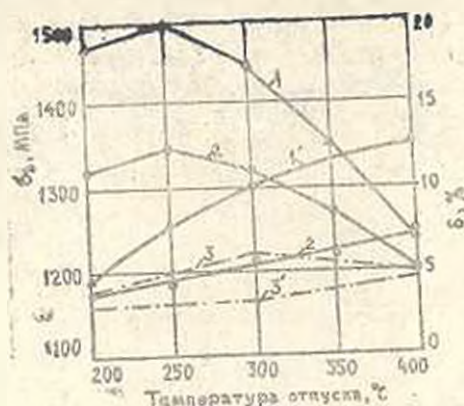


Рис. 3. Прочность на разрыв  $\sigma_b$  и относительное удлинение  $\delta$  порошковых сталей: 1 — СПЭ60-4 ( $C=0,6 \text{ мас. \%}$ ), экструзия с немедленной закалкой (BTMO); 2 — СПЭ60-4 ( $C=0,6 \text{ мас. \%}$ ), экструзия, обычная закалка (810–840°C); 3 — СП60-4 ( $C=0,6 \text{ мас. \%}$ ), остаточная пористость — 2%, закалка по режиму ПТМО.

Анализ рис. 3 показывает, что максимальная прочность сталей СПЭ60-4 (Э—экспериментальная) и СП60-4 достигается при температуре отпуска 250 и 300°C. Относительное удлинение  $\delta$  возрастает с повышением температуры отпуска и соответственно снижается прочность  $\sigma_b$ . Из рис. 3 также видно, что лучшие свойства сталей обеспечивает BTMO (кривые 1 и 1'). При BTMO деформация осуществляется вблизи точки  $A_1$  и вследствие достаточной термической активности возникающая ячеистая субструктура преобразуется в полигонизованную или частично рекристаллизованную. При таком температурном режиме диффузионные процессы обеспечивают перераспределение атомов углерода путем концентрации на дефектах кристаллического строения. Скопления атомов углерода на субграницах стабилизируют субструктуру аустенита и способствуют ее более полному наследованию мартенситом. Следствием этого является равномерность распределения дислокаций ввиду протекания процесса полигонизации и меньшая концентрация углерода в кристаллической решетке, способствующая снижению ее тетрагональности.

Обычная закалка (ОЗ) экструзированной стали (кривые 2 и 2'), занимает промежуточное положение между BTMO и ПТМО (кривые 3 и 3'), т. е. остаточная пористость и дефектная структура горячепрессованной стали не позволяют повысить уровень свойств до максимальных значений.

Соотношение максимальных значений  $\sigma_b$  термически обработанных сталей по трем режимам (BTMO, ОЗ, ПТМО—кривые 1, 2, 3) та-

ково—1,23:1,11:1, а соотношение пластичности  $\delta$  при температуре отпуска 300°C (кривые 1', 2', 3')—3,3:1,7:1. Таким образом, сочетание процессов экструзии и ВТМО является наилучшим видом термической обработки, т. к. обеспечивает высокий уровень механических свойств.



Рис. 4. Микроструктуры экструдированной стали 60ГДМ: а — без термообработки (Ф — П); б — после ВТМО (дескартурированный мартенит); в — после закалки (игольчатый мартенит); г — после закалки и низкого отпуска ( $\times 500$ ).



На рис. 4 представлены микроструктуры экструдированной стали СР60-4. Без термообработки структура представляет собой (Ф+П), т.е. соответствует типичной структуре доэвтектоидной стали (рис. 4 а), после ВМТО—бесструктурный мартенсит (рис. 4, б), после обычной закалки—игольчатый мартенсит (рис. 4, в), а после низкого отпуска—отпущенный мартенсит с трооститом отпуска (рис. 4, г). Следовательно, структура порошковых сталей полностью соответствует структурам стандартных сталей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Технологии получения стального порошка из чугуниной стружки//Г. А. Асатрян, М. К. Зурнакян, Г. Х. Карапетян и др./Теория и практика порошковой металлургии. Межвуз. тем. сб. науч. тр. по порошк. металл.—Ереван, 1982.—С. 118—122.
2. Манукян Н. В., Асатрян Г. А., Зурнакян М. К. Получение стального порошка из чугуниной стружки методом содового рафинирования//Композитные материалы и их обработка: Межвуз. тем. сб. науч. тр.—Ереван, 1985.—С. 3—6.
3. Асатрян Г. А., Агбалиян С. Г., Зурнакян М. К. Исследование экструзии стального порошка, полученного из чугуниной стружки методом содового рафинирования//Структура и свойства сплавов в зависимости от технологии получения и термообработки: Межвуз. тем. сб. науч. тр. по геол., горн. делу, минерал. и металл.—Ереван, 1987.—С. 13—18.
4. Манукян Н. В. Технологии порошковой металлургии.—Ереван: Айастан, 1986.—232 с.
5. Ерчаков С. С. Термическая обработка порошковых стальных деталей.—Л.: ЛДТИП, 1981.—24 с.
6. Высокопрочные низколегированные печенные стали И. Д. Радомыслский Л. И. Костырко, С. Г. Напиря-Волгики и др.//Ки.: Конструкционные материалы—Киев: Наукова думка, 1987.—С. 3—8.

ЕрПН

15. VI 1990

Изв. АН Армии (сер ТП), т. XLIV, № 5—6, 1991, с. 222—226.

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 537.312.5

А. Х. АВАГЯН, Ж. Г. ДОХОЛЯН, С. Х. ХУДАВЕРДЯН

## МЕТОД ЛАЗЕРНОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТОНКИХ ПОЛНКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ

Разработан метод лазерной рекристаллизации тонких полнкристаллических слоев. Получено аналитическое выражение, связывающее параметры лазерного пучка и рекристаллизующего материала. На основе предложенного метода собраны установка, которая хорошо зарекомендовала себя при экспериментальных работах.

Ил. 2. Библиогр.: 3 назв.

Մշակվել է նորը բարձրարժեքային շերտերի բաղերային վերաբյուրեղացումը հզորա-  
նակությամբ և ժամանակին արտահայտություն, որը կապ է առնվում բաղերային շերտի և  
վերաբյուրեղացման հերթի պարամետրերին միջին խառնարկով և հզորությամբ և նոր  
ստեղծված, որը արդեն իսկ օգտագործվում է փորձարարական աշխատանքներում:

В последние годы область исследования влияния лазерного луча на свойства кристаллических структур находится в центре внимания исследователей [1]. Работы в этом направлении открывают возможность осуществления рекристаллизации лазерным лучом полукристаллических полупроводниковых слоев и расширения переносимых параметров транзисторных интегральных схем (ТМИС), которые являются интегральными схемами (ИС) будущего. ТМИС состоит из множества вертикально наложенных активных слоев, разделенных изолирующими материалами, в которых размещаются различные приборы и функциональные устройства, например, фотодатчики, логические схемы, ЗУ и центральные процессоры. В результате этого в ТМИС по сравнению с двухмерными интегральными схемами (ДИС), которые уже в 90-ых годах достигли предела минимизации, заметно может быть увеличена плотность упаковки и функциональности [2].

Создание ТМИС требует сложного технологического оборудования, основным из которых является установка рекристаллизации полукристаллических слоев. Отсутствие таких установок в отечественном производстве заставляет разработчиков прибегать к импортным разроботкам.

В настоящей работе описывается метод построения установки лазерной рекристаллизации. Перед нами стояла задача — лазерным лучом при прохождении стр по поверхности тонкого твердотельного слоя многослойной структуры при определенных скоростях движения лучка обеспечить расплавление верхнего слоя без существенного изменения параметров нижних слоев. Для этого необходимо было рассчитать энергетические параметры лазерного лучка при его взаимодействии с полупроводником. При расчетах учитывались диаметр падающего на образец лучка, минимизация потерь, коэффициент поглощения излучения соответствующими материалами, коэффициент отражения от поверхности и скорость движения столика с образцом по двум координатам. При этом принимались во внимание толщина расплавляемого слоя и постоянная температура плавления.

В расчетах допускалось наличие в пределах точки нагрева лазерным лучом поглощающего слоя толщиной  $d_0$  (рис. 1). С изменением площади сечения от  $S_d$  — на выходе лазера до  $S_0$  — на поверхности слоя интенсивность лазерного лучка изменялась по закону

$$P_0 = P_d \frac{S_d}{S_0(1-R)} \quad (1)$$

где  $P_0$  и  $P_d$  — интенсивности монохроматического светового излучения на входе в слой и на выходе лазера,  $R$  — коэффициент отражения. Известно, что поглощение света в полупроводниках описывается законом Бугера—Ламберта [3]:  $P = P_0 e^{-\beta x}$ , где  $x$  — координата по направлению проникновения света, а  $\beta$  — коэффициент поглощения. В случае очень тонких слоев ( $\leq 1$  мкм) преломлением лучей можно пренебречь и считать, что сечение лучка везде одинаково и равно  $S_d$ . Тогда распределение тепла в слое  $x$  за время  $dt$  будет

$$\partial Q = P_0 e^{-\gamma} \frac{dS}{S_0(1-R)} dt. \quad (2)$$

Из рис. 1 видно, что  $dS = 2\pi y dy$ , тогда

$$\partial Q = \frac{2\pi y^2}{S_0(1-R)} P_0 e^{-\gamma} dy dt. \quad (3)$$

С другой стороны

$$\partial Q = \partial Q_n + \partial Q_r, \quad (4)$$

где  $\partial Q_n$  — тепло, подводимое к элементарному объему, а  $\partial Q_r$  — тепловые «потери», возникающие вследствие градиента температуры. Подводимое тепло равно

$$\partial Q_n = c dm (T_{пл} - T_0), \quad (5)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость вещества,  $T_{пл}$  — температура плавления,  $T_0$  — температура окружающей среды,  $dm$  — масса расплавляемого слоя. Запишем ее через удельную плотность  $\rho$

$$dm = \rho 2\pi y dy dx. \quad (6)$$

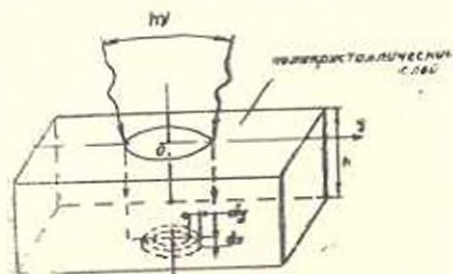


Рис. 1. Блуждающий элементарный объем в тонком слое поликристаллического вещества

Тепловые «потери» являются результатом процесса передачи внутренней энергии вне объема плавления. Поверхность объема поглощения находится при более высокой температуре, чем его внешняя окрестность, вследствие чего имеет место поток энергии по направлению постепенного снижения температуры. Тогда количество тепла  $\partial Q_r$ , проходящее за время  $dt$  через взятую в слое площадку  $dS$ , нормальную к той линии, вдоль которой течет поток энергии, пропорционально времени  $dt$ , площадке  $dS$  и температурному градиенту  $dT/dx$ . Следовательно

$$\partial Q_r = -\chi_r \frac{dT}{dx} dS dt,$$

где  $\chi_r$  — коэффициент пропорциональности.

Аналогичное выражение получим и для потока энергии вдоль направления оси  $y$

$$\partial Q_{tr} = -\kappa \frac{dT}{dy} dS dt.$$

тогда

$$\partial Q_t = \partial Q_{tr} + \partial Q_{tr}.$$

Суть задачи в том, чтобы лазерным лучом осуществлять локальный разогрев пужной степени лишь в пределах элементарного объема (имеет место адиабатическое приближение). Этого можно достичь при обеспечении необходимой мощности пучка и скорости движения столка. Тогда в допустимых пределах градиент температуры в обоих направлениях можно принять равным нулю, т. е.  $\partial Q_t = 0$ . Таким образом из выражения (4) получим

$$\partial Q = \partial Q_t \quad (7)$$

С учетом уравнений (3), (5) и (6) выражение (7) примет следующий вид:

$$\frac{2\pi y}{S_0} P_0 e^{-\kappa y} dy dt = 2c\rho y (T_m - T_0) dy dx$$

После соответствующих преобразований получим

$$\frac{P_0}{S_0} \int_0^{t_n} dt = c\rho (T_m - T_0) \int_0^h e^{\kappa x} dx. \quad (8)$$

Здесь предел интегрирования  $t_n$  соответствует времени, в течение которого происходящее излучение успевает расплавить слой толщиной  $h$ . Из выражения (8) получим зависимость времени излучения от площади расплавляемого слоя, которое с учетом выражения (1) примет следующий вид:

$$t_n = \frac{c\rho S d^2 (1-R)(T_m - T_0)}{2P_0 S_0} (e^{\kappa h} - 1). \quad (9)$$

По формуле (9) можно рассчитать время излучения при известных значениях мощности лазерного луча, толщины слоя и температуры окружающей среды, а по формуле  $V = d/t_n$ , где  $d$ —диаметр пучка—скорость движения образца под лучом. Варьируя этими параметрами, можно найти оптимальный технологический режим рекристаллизации конкретных веществ.

Блок—схема установки, позволяющая осуществлять плавное изменение вышеуказанных параметров, показана на рис. 2. Луч от лазера 1, который имеет систему охлаждения и блок управления (БУЛ), через оптическую систему 2 и объектив 3 падает на образец 4. Образец с помощью вакуумного насоса 6 прикрепляется к столику 5, который, двигаясь по двум координатам, обеспечивает сканирование поверхности лазерным лучом. Лазер и оптическая система находятся на микроштабах, с помощью которых производится юстировка и фоку-

сировка падающего на образец луча. Специальный нагреватель между стержнем и образцом обеспечивает общий нагрев образца до  $600^{\circ}\text{C}$ , что при рекристаллизации уменьшает межатоmные механические напряжения, gradients температуры и облегчает процесс локального расплавления.

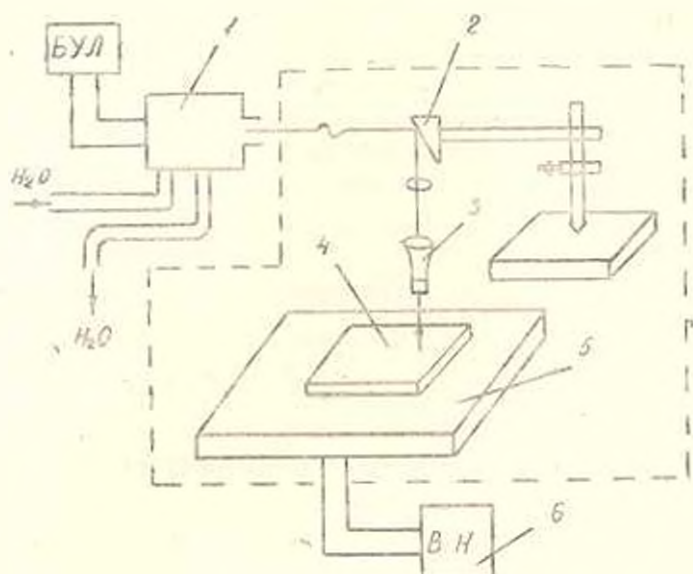


рис. 2. Установка лазерной рекристаллизации поликристаллических структур.

Разработанная установка была опробована для проведения экспериментальных работ по воздействию электромагнитного излучения на свойства кристаллических структур. Результаты опробования подтвердили ее пригодность для рекристаллизации структурных пленок.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Вахабов Д. А., Закиров А. С. и др. Исследование влияния лазерного воздействия на свойства кремния, легированного золотом // ФТИИ.—1986.—Т. 20, вып. 4.—С. 747—749.
2. Астахов П. Тенденции развития трехмерных интегральных схем // ТИИЭР.—1996.—Т. 74, № 12.—С. 120—132.
3. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике.—М.: Наука, 1980—507 с.

ЕрПИ

6. VI. 1990

УДК 62.50

С. Е. ЧИМИШКЯН

# КОНЦЕПЦИЯ НОРМАЛЬНОЙ ДОМИНАНТНОСТИ В ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается модификация известного частотного метода синтеза многосвязных систем автоматического управления, позволяющая более корректно и целенаправленно сформулировать методику синтеза.

Из 3. Библиогр.: 7 назв.

*Մոտիվով է քննարկվում ավելանալի կապակցման համակարգերի համադրման հանրահատիկային մեթոդի մի մոდიֆիկացիա, որը ավելի և ավելի ճշգրիտ է համադրման մեթոդի տարբերակները և նշանակալիությունը:*

Одним из методов синтеза многосвязных систем автоматического управления (МСАУ) вида рис. 1, близких к графоаналитическим частотным методам классической теории автоматического управления, является так называемый метод нормализующего компенсатора [1]. Сущность его заключается в синтезе частотной коррекции  $K(j\omega)$ , обеспечивающей:

а) нормальность частотной передаточной матрицы (ПМ) разомкнутой МСАУ  $Q(j\omega)$ , т. е. условие

$$Q(j\omega)Q(j\omega)^* = Q(j\omega)^*Q(j\omega), \quad \forall \omega \geq 0, \quad Q(j\omega) = G(j\omega)K(j\omega), \quad (1)$$

где  $G(j\omega)$  и  $K(j\omega)$  — частотные ПМ объекта и компенсатора;

б) желаемые характеристические годографы (ХГ)  $q_i(j\omega)$ ,  $i = 1, m$ , т. е. собственные значения частотной ПМ  $Q(j\omega)$ , где  $m$  — число входов (выходов) объекта.

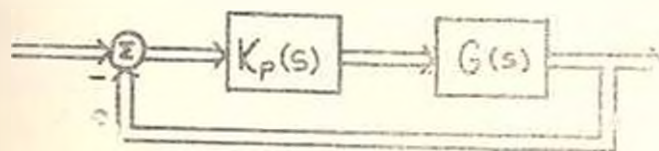


рис. 1. Структура линейной МСАУ

Свойство нормальности (1) позволяет реализовать ряд полезных свойств [1]. Поскольку ряд принципиальных свойств нормальной МСАУ (1) (устойчивость и качество) определяется семейством ХГ, то оказывается возможным свести синтез МСАУ к синтезу отдельных характеристических систем с частотными характеристиками  $q_i(j\omega)$  по классической методике. Это позволяет также построить процедуру синтеза абсолютно устойчивых нелинейных МСАУ [2].

В результате такого синтеза получается лишь желаемая частотная ПМ компенсатора  $K(j, \omega)$ , которую необходимо аппроксимировать физически реализуемой дробно-рациональной ПМ  $K_p(s)$ . Стандартный подход к этому этапу синтеза заключается в решении задачи наименьших квадратов

$$\min_{K_p} \sum_{n=1}^N w(\omega_n) \|G(j\omega_n) K_p(j\omega_n) - Q(j\omega_n)\|_2^2, \quad (2)$$

где  $w(\cdot)$  — функция веса, а  $\|A\|_2$  — евклидова норма матрицы  $A$  [3]. Однако процедуры типа (2) неэффективны, т. к. отсутствует связь между конечной целью синтеза, т. е. желаемыми свойствами МСАУ, и целью оптимизации параметров коррекции (2), что отмечалось ранее [4, 5].

Для того, чтобы устранить отмеченный недостаток, необходимо изменить концепцию синтеза: добиваться квазинормализации вместо строгой нормализации (1), т. е. построения квазинормальной или нормальной доминантной МСАУ, близкой к идеальной (нормальной) системе (1) в смысле свойств, но не близости частотных характеристик, что не одно и то же. Эффективной мерой близости МСАУ к нормальности (1) служит показатель нормальной доминантности (НД) [4, 6]

$$I(\omega) = \|G(j\omega) K_p(j\omega) - Q(j\omega)\|_2 / \min\{1 + q_1(j\omega)\}, \quad (3)$$

где  $\|A\|_2$  — спектральная норма матрицы  $A$  [3]. НД МСАУ определяется как МСАУ, для которой выполняется условие НД  $I(\omega) < 1$ ,  $\forall \omega > 0$ .

Понятие нормальной доминантности позволяет эффективно решить задачу анализа свойств МСАУ по схеме: анализ свойств нормальной части  $Q(j\omega)$  по ее ХГ  $q_1(j\omega)$  и оценка возможного ухудшения свойств из-за отклонения от нормальности по показателю НД  $I(\omega)$  [4, 6]. Однако при синтезе МСАУ больший интерес представляет задача определения границы показателя НД  $I(\omega)$ , такой, что при выполнении условия  $I(\omega) > I^*$ ,  $\forall \omega > 0$  гарантируются свойства НД МСАУ, не хуже заданных. Для каждого отдельного ( $k$ -го) свойства МСАУ можно определить специфичную нелинейную функцию вида

$$I_k(\omega) = F_k(\{q_i(j\omega)\}, A_k(\omega), \omega), \quad (4)$$

где  $A_k(\omega)$  — характеристика  $k$ -го свойства. Таким образом можно рассмотреть:

1) устойчивость; 2) показатель колебательности  $M$ ; 3) точность отработки гармонических внешних воздействий; 4) запасы устойчивости или допустимую норму мультипликативной неопределенности; 5) абсолютную и  $L_\infty$  — устойчивость в спектре  $(\alpha, \beta)$ ; 6) устойчивость методом гармонической линеаризации.

В частности, условие устойчивости линейной МСАУ, представленное на рис. 1, имеет вид  $I_1(\omega) = 1$ , а показатель колебательности  $M$  обесценивается при

$$\bar{L}_i(\omega) = \frac{a(\omega)}{1 + a(\omega)}, \quad a(\omega) = \frac{M - (\min_i |1 + q_i(j\omega)|)^{-1}}{(\min_i |1 + q_i(j\omega)|)^{-1}}.$$

Остальные выражения  $F_k$  не приводятся из-за их громоздкости.

Общая граница  $\bar{L}(\omega)$  определяется как

$$\bar{L}(\omega) = \min_k \bar{L}_k(\omega), \quad \forall \omega > 0. \quad (5)$$

Граница  $\bar{L}(\omega)$  позволяет построить эффективную процедуру аппроксимации компенсатора в виде многокритериальной оптимизации параметров  $K_p(s)$  с критериями оптимальности [5]

$$L(\omega_n) \approx \bar{L}(\omega_n), \quad \omega = \overline{1, \infty}. \quad (6)$$

Тем самым активно формируется заданное распределение погрешности реализации коррекции  $\bar{L}(\omega)$ . Очевидно, что такая процедура ориентирована на конечную цель синтеза — свойства МСАУ. Аналогичные построения возможны и на основе мультипликативной формы показателя НД

$$L(\omega) = \|Q(j\omega)\|^{-1} \|G(j\omega)K_p(j\omega) - I\|_2 / \min_i |1 + q_i(j\omega)|^{-1}.$$

Таким образом, концепция нормальной доминантности позволяет более корректно и целенаправленно сформулировать методику синтеза (1) и получить в результате более удобную процедуру синтеза.

В качестве примера рассмотрим синтез САУ движением самолета F-8. Объект неустойчив и описывается линеаризованной моделью в пространстве состояний

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases}$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -2,6 & 0,25 & -3,8 & 0 \\ -0,075 & -0,27 & 4,4 & 0 \\ 0,078 & 0,99 & -0,23 & 0,052 \\ 1,0 & 0,078 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 17 & 2 \\ 0,082 & -3,2 \\ 0 & 0,046 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

с двумя входами (отклонение элеронов и руля направления) и двумя выходами (угол скольжения и скорость рысканья) [7]. Требуется построить линейный компенсатор, обеспечивающий:

1) устойчивость, 2) показатель колебательности  $M \leq 1,02$ , 3) границу спектральной нормы допустимого мультипликативного возмущения  $\leq 0,8$ , 4) абсолютную устойчивость САУ в секторе  $(0,2, 2)$ .

В качестве желаемых ХГ выбраны

$$q_1(s) = \frac{1}{s(0.3s + 1)}, \quad q_2(s) = \frac{233s + 1}{s(233s - 1)(0.3s + 1)},$$

причем неустойчивый полюс ХГ  $q_2(s)$  — суть неустойчивый полюс объекта. Устойчивость нормальной части иллюстрируется диаграммой Найквиста на рис. 2.

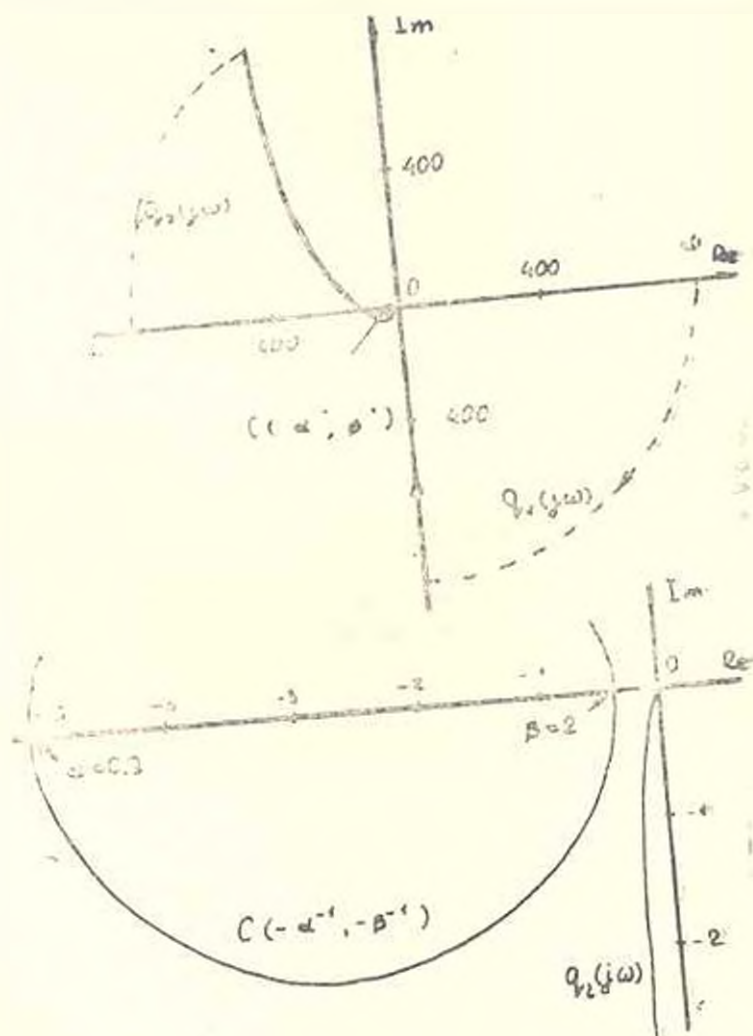


Рис. 2. Диаграмма Найквиста: проверка устойчивости и абсолютной устойчивости в секторе (0.2, 2).

На рис. 3 изображены кривые  $\bar{L}_2(\omega)$ ,  $\bar{L}_2 = 1, 4$  (4), соответствующие выбранным ХГ и требуемым выше свойствам МСАУ, результирующая граница  $\bar{L}(\omega)$  (5) и истинное значение  $L(\omega)$ , соответствующее результату оптимизации параметров компенсатора [6]

$$K_p(s) = \frac{0,23(7,3s + 1)(-3,7s + 1)(0,41s + 1)}{s(3,41s + 1)(0,317s + 1)} \cdot \frac{0,258(124s + 1)(0,403s + 1)(0,011s + 1)}{s(1,47s + 1)(0,297s + 1)} \cdot \frac{-1,39(10,7s + 1)(0,0101s^2 + 0,168s + 1)}{s(10,3s + 1)(0,290s + 1)} \cdot \frac{0,782(10s + 1)(0,585s + 1)}{s(1,53s + 1)(1,34s + 1)}$$

Как следует из выводов разностного принципа  $\bar{T}(s)$  и  $\bar{L}(s)$ , требуемые свойства МСАУ достигаются с помощью (12).

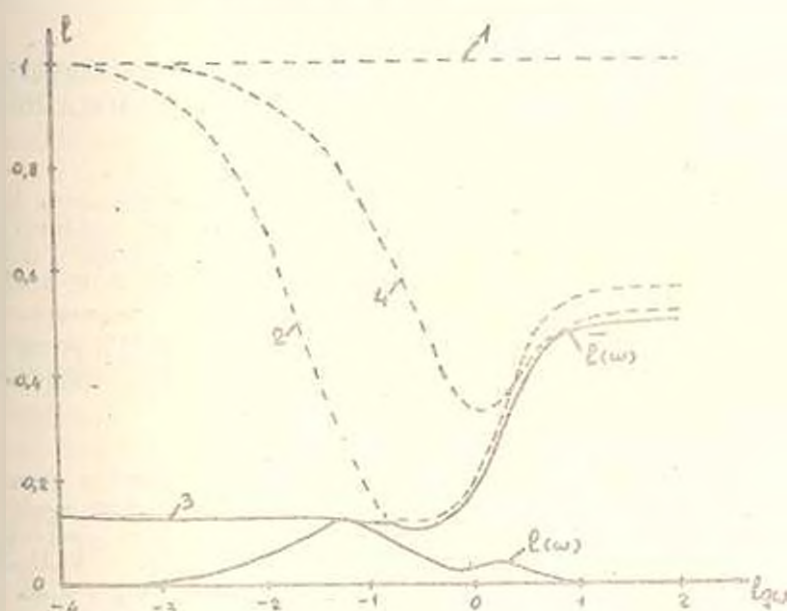


Рис. 3. Границы показателя Д. 1 — устойчивость, 2 — показатель колебательности, 3 — мультиинвариантное возмущение, 4 — абсолютная устойчивость

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hung V. S., MacFarlane A. G. J. Multi-variable feedback: a quasi-classical approach. — Berlin: Springer, 1982. — 192p.
2. Карелин Э. В., Чимишкян С. Е. Метод синтеза класса абсолютно устойчивых нелинейных многомерных САУ. Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. — 1986. — Т. XXXIX, № 4. — С. 43—46.
3. Васильдин В. В. Линейная алгебра. — М.: Наука, 1980. — 400 с.
4. Чимишкян С. Е. Проектирование робастных многосвязных САУ: принцип нормально доминантности/Сб. Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками. — Новосибирск, 1988. — С. 98—104.
5. Чимишкян С. Е. Методы построения передаточной матрицы компенсатора нормально доминантной многосвязной САУ/Ереван, Ереванск. политех. ин-т. 1989. — 8 с. — Деп. в АрмНИНТИ 12 июля 1989 г., № 33—Ар.

6. Чилинских С. Е. Поразительные доминантные многосвязные системы и их анализ // Изв. вузов СССР. Электромеханика, — 1988 — № 4. — С. 95 — 96.
7. De La Sen M., Marco J. L., Lopez-Abadía C. Multirate adaptive control with applications to integer dynamics of discrete time J. Control. — 1989. — V. 45. № 1 — P. 749 — 778.

ИИИЭлектромаш

14. IV. 1990

Изв. АН Армении (сер. ТИ), т. XLIV, № 5 — 6, 1991, с. 232 — 235.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.324

И. П. ХАЧИЯН, А. Г. ТАРХАНИЯН

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СТАНЦИЙ В КОЛЬЦЕВУЮ ЛОКАЛЬНУЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНУЮ СЕТЬ

Предлагается способ решения задачи определения последовательности включения транспортных станций (ТС) в локальную вычислительную сеть, архитектура которой соответствует международному стандарту 8802.7. Задача сведена к построению минимального цикла (ПЦ) графа, вершинами которого являются ТС. Разработаны и исследованы алгоритмы построения ПЦ. Способ позволяет обеспечить наибольшую пропускную способность сети и минимизировать ее стоимость. Оценка пропускной способности производится на основе имитационной модели сети. Способ используется при синтезе топологии локальных вычислительных сетей.

Табл. 1. Библиогр.: 2 назв.

Ստացարկված է 8802.7 միջազգային ստանդարտին համապատասխանող տեղային հաշվարկային ցանցի արանձադրության կայանների միացման հաջորդականության որոշման խնդիրը լուծման միջոցով: Խնդիրը վեր է ածված ափսոսելի համախոսության ցիկլի կառուցմանը, որի գաղափարները հերկայանում են արանձադրության կայանները մշակված և նետարդված են համախոսության ցիկլի կառուցման ավարտի մեջ: Ստացարկված միջոցով թույլ է տալիս ապահովել հաշվարկային ցանցի մեծագույն արագագործությունը և միաժամանակ նվազեցնել նրա արժեքը: Հաշվարկային ցանցի արագագործությունը որոշվում է ցանցի նմանակման մոդելի օգնությամբ: Միջոցը օգտագործվում է տեղային հաշվարկային ցանցերի տուրքերի համալիրման ժամանակ:

В связи с массовым использованием локальных вычислительных сетей (ЛВС) задачи, возникающие при их проектировании, являются актуальными. Особое место среди них занимает задача синтеза топологии ЛВС. В [1] приводится описание метода синтеза топологии кольцевой ЛВС. Метод применим для ЛВС конкретного типа, соответствующего международному стандарту 8802.7. Согласно методу на одном из этапов синтеза топологии решается задача определения последовательности включения транспортных станций (ТС) в ЛВС. В работе предлагается способ решения этой задачи. Исходными данными указанной задачи являются: число ТС и координаты мест их расположения; возможные способы соединения ТС между собой; допустимое время выполнения совокупности задач  $T_i$ .

Введем в рассмотрение граф  $G(V, E)$ , где  $V$  — множество вершин графа, каждая из которых соответствует одной из ТС ЛВС, а  $E$  — множество ребер графа, каждое из которых соответствует одному из возможных способов соединения ТС. Граф  $G$  является полностью связным. Каждый из способов соединения ребер графа получается на основе исследования конкретных условий на объекте внедрения ЛВС. Каждое ребро графа имеет вес, который представляет собой длину кабеля, соединяющего ТС. Граф  $G$  является взвешенным, а в общем случае может быть многосвязным.

Определение последовательности включения ТС в ЛВС заключается в нахождении гамильтонова цикла на графе  $G$ , которому соответствует минимальная стоимость ЛВС при условии выполнения ограничения

$$T_c \leq T_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где  $T$  — среднее время реализации совокупности задач, решаемых в ЛВС.

Способ определения последовательности включения ТС в ЛВС состоит из двух этапов. На первом этапе из графа  $G$  выделяется подграф  $G_1(V, E_1)$ , где  $E_1 \subset E$ . Он отличается от  $G$  тем, что он не является многосвязным. Множество  $E_1$  включает в себя лишь те ребра множества  $E$ , которые имеют наибольшую длину для любой из пар вершин. На графе  $G_1$  строится гамильтонов цикл (ГЦ) максимальной длины, причем ГЦ существует, т. к. граф  $G_1$  является полностью связным. Для построения ГЦ максимальной длины графа  $G_1$  используются три алгоритма.

В соответствии с алгоритмом 1 в качестве исходной вершины ГЦ выбирается та вершина графа  $G_1$ , которой инцидентно ребро с максимальным весом. ГЦ строится путем последовательного включения вершин графа  $G_1$ . На каждом шаге в ГЦ включается та из вершин графа  $G_1$ , которая еще не включена в цикл и которая связана с текущей вершиной ГЦ ребром с максимальным весом. Текущей вершиной ГЦ является последняя включенная в цикл вершина. Выполнение алгоритма 1 завершается, если в  $G_1$  не существует вершин, не включенных в ГЦ.

В соответствии с алгоритмом 2 в качестве начальной части ГЦ выбираются те две вершины графа  $G_1$ , которые связаны ребром максимального веса. На каждом шаге построения ГЦ в его состав последовательно включается та из вершин графа  $G_1$ , для которой выполняются следующие условия: 1) вершина не включена в ГЦ; 2) вершина связана с одной из конечных вершин ГЦ ребром с максимальным весом. Конечными вершинами ГЦ являются две крайние вершины построенной части ГЦ. Выполнение алгоритма 2 завершается, если в  $G_1$  не существует вершин, не включенных в ГЦ.

Алгоритмы 1 и 2 являются субоптимальными и имеют полиномиальную вычислительную сложность. Сложность алгоритма 1 равна  $n^2 - 2n$ , а алгоритма 2 —  $2(n^2 - 2n)$ . В отличие от алгоритмов 1 и 2,

алгоритм 3 позволяет получить оптимальное решение. В основу алгоритма 3 положен метод ветвей и границ [2]. Алгоритм 3 имеет экспоненциальную вычислительную сложность  $(n/2)^4$ . В приведенных выражениях оценки вычислительной сложности алгоритмов « $n$ » представляет собой число вершин графа  $G_1$  (размерности графа  $G_1$ ).

Алгоритмы 1, 2 и 3 реализованы в программы для персональных компьютеров типа IBM PC. Сравнительный анализ точности алгоритмов, выраженный в процентах, для различных чисел вершин графа  $G_1$ , приведен в таблице. При этом для каждой размерности графа  $G_1$  выбирались десять различных вариантов весов ребер графа  $G_1$  (весы выбирались с помощью генератора случайных чисел). Расчеты были проведены на персональном компьютере IBM PC/AT с тактовой частотой 16 МГц. При этом для графа  $G_1$  размерностью 10 с помощью алгоритмов 1 и 2 пролонгируется в течение нескольких секунд, а с помощью алгоритма 3—в течение двух часов. В связи с невозможностью получения оптимального решения на основе алгоритма 3 за приемлемое время для графов большей размерности (до 30 вершин) были проведены исследования алгоритмов 1 и 2. Результаты вычислений показывают, что в 70% случаев алгоритм 2 дает лучший результат, чем алгоритм 1. Алгоритмы 1 и 2, имеющие достаточно высокую точность и приемлемое время решения, целесообразно использовать для построения ГЦ максимальной длины графа  $G_1$  размерности больше 10. Для графа меньшей размерности целесообразно использовать алгоритм 3.

| Алгоритм | Число вершин графа |       |       |       |       |       |
|----------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 1                  | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| 1        | 95,46              | 97,28 | 93,97 | 93,48 | 93,42 | 92,31 |
| 2        | 96,95              | 97,63 | 94,54 | 95,04 | 94,69 | 93,57 |
| 3        |                    |       | 100   |       |       |       |

Для полученного в результате выполнения первого этапа ГЦ необходимо получить значение  $T_c$  на основе имитационной модели ЛВС и проверить выполнение условия (1). Если это условие не выполняется, то невозможно выбрать такую последовательность включения ТС в ЛВС, при которой выполнялись бы ограничения на вероятностно-временные характеристики решаемых в ЛВС задач. В противном случае необходимо перейти к выполнению второго этапа.

На втором этапе на основе графов  $G$  и  $G_1$  строится граф  $G_2(V, E_2)$ . Граф  $G_2$  в общем случае является многосвязным. Множество  $E_2$  включает в себя все те ребра графа  $G$ , которые параллельны ребрам графа  $G_1$ . Таким образом, ребра графа  $G_2$  соответствуют всем возможным способам соединения ТС, включенных в ЛВС согласно последовательности, определенной на первом этапе. Каждое из ребер

множества  $E_2$  имеет два веса: протяженность и стоимость соединения. При определении стоимости соединения учитываются тип и физическая длина кабеля, число повторителей и сложность прокладки.

Во время второго этапа уменьшается стоимость ЛВС при условии сохранения последовательности включения ТС в ЛВС, определяемой ГЦ. На этапе выполняются следующие шаги.

Шаг 1. Вычисляется стоимость ЛВС, построенной в соответствии с ГЦ максимальной длины. Значение этой стоимости обозначим  $C_{L_{\max}}$ .

Шаг 2. Для существующей последовательности включения ТС в ЛВС, задаваемой ГЦ, выбираются те ребра, которые определяют минимальную стоимость ЛВС. Значение этой стоимости обозначим  $C_{\min}$ . Для полученной топологии ЛВС проверяется условие (1). Если оно выполняется, то определена последовательность включения ТС в ЛВС. В противном случае выполняется шаг 3.

Шаг 3. Определяется множество  $E$  всех тех ребер графа  $G_2$ , для которых выполняется система неравенств (2). Элементы множества  $E$ , упорядочиваются по возрастанию стоимости

$$\begin{cases} C_{L_{\max}} - C \geq C_{\min} \\ L_{\max} - l \geq L_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

В (2) используются следующие обозначения:  $l, C$  — длина и стоимость ГЦ при включении в его состав того ребра графа  $G_2$ , для которого проверяется выполнение системы (2);  $L_{\max}$  — длина ГЦ максимальной длины, полученного на первом этапе;  $L_{\min}$  — длина того ГЦ, стоимость которого была обозначена ранее  $C_{\min}$ .

Шаг 4. Ребро наименьшей стоимости множества  $E$  включается в ГЦ взамен альтернативного ему ребра и исключается из множества  $E$ .

Шаг 5. Для полученной топологии ЛВС проверяется условие (1). Если условие выполняется, то решение получено. В противном случае повторяется выполнение шага 4.

Сходимость приведенного алгоритма обусловлена тем, что множество  $E$  является конечным.

Предложенный способ определения последовательности включения ТС в ЛВС реализован в виде комплекса программ на языке Турбо-Паскаль и используется при синтезе топологии ЛВС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хачичян Н. Г., Тарханян А. Г., Маркосян М. В. Синтез топологии локальной вычислительной сети CITNET/15 на Всесоюзном семинаре по выч. сетям. Тез. докл. М.—Л., 1990.—Ч. 1.—С. 161—165.
2. Давыдов Б. Комбинаторика для программистов. М.: Мир, 1988.—213 с.

УДК 628.36.628.16.067.601.24

В. С. САРКИСЯН, А. Ж. ЧИГЧЯН, А. А. САРГСЯН

# ФИЛЬТРОВАНИЕ ЖИДКОСТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ВЗВЕШЕННЫЕ И ЭМУЛЬГИРОВАННЫЕ ВЕЩЕСТВА НА РАДИАЛЬНЫХ ФИЛЬТРАХ

Рассматривается метод расчета радиальных фильтров, используемых для очистки жидкости, содержащей взвешенные и эмульгированные вещества. В процессе фильтрации происходит: а) снижение внутренней зоны фильтрующего материала эмульгированными веществами; б) образование осадка на его поверхности. Рассмотрены варианты расчета.

Получены эмпирические зависимости: а) от времени, определяющего установившийся перепад воды относительно значения перепада давления по фильтру; б) от постоянного перепада давления—значения расхода. Кроме того, на этих координатах внешней подвижной границы осадка в внутренней зоне застывания, а также продолжительность флуктуаций.

Из 1. Библиогр.: 2 назв.

[illegible]

Որպեսզի հնչի համայնքի անդամների և անդամակազմի անդամների անունները, անհրաժեշտ է հարկի կտրուկ ցուցանիշները և անհրաժեշտ փոխարկերը:

В работе [1] рассмотрен процесс очистки жидкости от взвешенных загрязняющих веществ. Зачастую, кроме этих загрязнений очищенная жидкость содержит эмульгированные вещества, которые качественно влияют на технологический процесс фильтрования.

При фильтровании жидкости, содержащей взвешенные и эмульгированные вещества, через пористый слой происходит заиливание внутренней зоны фильтрующего материала и образование внешнего осадка на нем [2]. На рисунке схематично показано сечение фильтра с внутренней зоной заиливания и внешним осадком.

Рассмотрим процесс фильтрования жидкости, содержащей взвешенные и эмульгированные вещества на радиальных фильтрах. В этом случае при жестком режиме процесс описывается уравнениями

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_i}{\partial r} = 0, \quad l = \begin{cases} 1, r_0 \leq r \leq r_1, & 2, r_1 \leq r \leq r_2, \\ 3, r_2 \leq r \leq r_3, & 4, r_3 \leq r \leq r_4. \end{cases} \quad (1)$$

где  $p$ —давление,  $r$ —радиальная координата,  $i = 1, 2, 3$  и 4—соответственно области фильтрующего элемента, незаляющей и заляющей части фильтрующего материала и осадка.

Технологически осуществление фильтрования производится либо при постоянном расходе фильтрации с увеличением перепада давления на фильтре, либо при постоянном перепаде давления с уменьшением расхода фильтрации из-за уменьшения проницаемости и увеличения толщины слоя. При фильтрации с постоянным расходом имеем следующие краевые условия:

$$p_1(r_0, t) = p_0 = \text{const}, \quad p_1(r_1, t) = p_2(r_1, t), \quad (2)$$

$$p_2(r_2, t) = p_3(r_2, t), \quad p_3(r_3, t) = p_4(r_3, t)$$

$$k_1 \frac{\partial p_1(r_1, t)}{\partial r} = k_2 \frac{\partial p_2(r_1, t)}{\partial r}, \quad k_2 \frac{\partial p_2(r_2, t)}{\partial r} = k_3 \frac{\partial p_3(r_2, t)}{\partial r}, \quad (3)$$

$$k_3 \frac{\partial p_3(r_3, t)}{\partial r} = k_4 \frac{\partial p_4(r_3, t)}{\partial r},$$

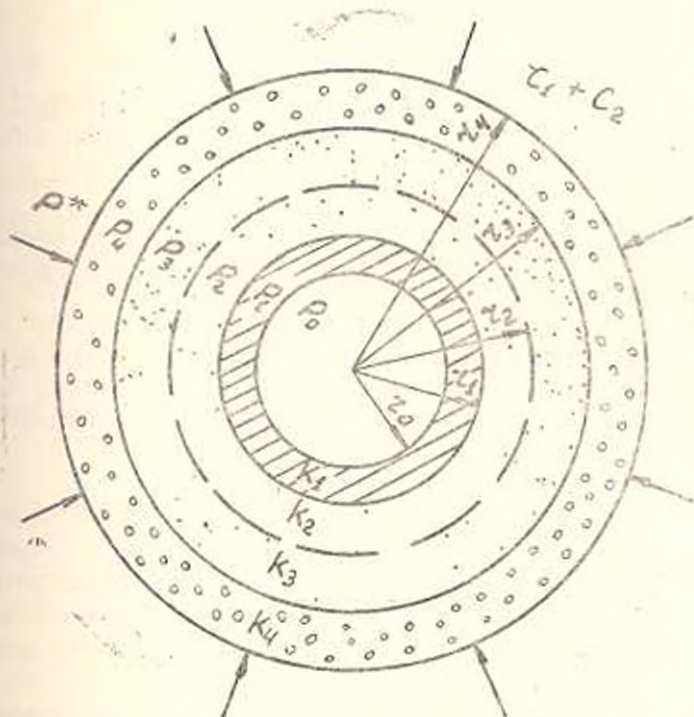


Рис. Расчетная схема фильтрования жидкости одновременно с образованием осадка и внутренней зоны заиливания

$$\frac{2\pi r_1}{\mu} \frac{\partial p_1(r_1, t)}{\partial r} = q = \text{const}, \quad (4)$$

$$(1 - n_1) \frac{dr_1}{dt} = \frac{c_1 q}{2\pi l r_1} = \frac{c_1 k_1}{\mu} \frac{\partial p_1(r_1, t)}{\partial r}, \quad (5)$$

$$(1 - n_2) \frac{dr_2}{dt} = \frac{c_2 q}{2\pi l r_2} = \frac{c_2 k_2}{\mu} \frac{\partial p_2(r_2, t)}{\partial r}, \quad (6)$$

$$r_1(t = 0) = r_2(t = 0) = r_3, \quad (7)$$

где  $c_1$  и  $c_2$ —концентрации эмульгированных и взвешенных веществ,  $n_3$  и  $n_4$ —активные пористости зеленой части фильтрующего материала и осадка,  $q$ —расход жидкости через фильтрующий элемент,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  и  $k_4$ —соответственно проницаемости фильтрующего элемента, незапняющей и запняющей частей фильтрующего материала и осадка,  $\mu$ —коэффициент динамической вязкости,  $t$ —время.

Из (1) при условиях (2)–(4) получаем следующие решения для определения давлений во всех зонах:

$$p_1 = p_2 + \frac{q\mu}{2\pi l k_1} \ln \frac{r}{r_0}, \quad r_0 \leq r \leq r_1; \quad (8)$$

$$p_2 = p_0 + \frac{q\mu}{2\pi l} \left( \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r}{r_1} \right), \quad r_1 \leq r \leq r_2; \quad (9)$$

$$p_3 = p_0 + \frac{q\mu}{2\pi l} \left( \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_3} \ln \frac{r}{r_2} \right), \quad r_2 \leq r \leq r_3; \quad (10)$$

$$p_4 = p_0 + \frac{q\mu}{2\pi l} \left( \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_3} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{k_4} \ln \frac{r}{r_3} \right), \quad (11)$$

$$r_3 \leq r \leq r_4.$$

Решая совместно (5)–(7), определим координату внешнего подвижного фронта осадка и внутреннего подвижного фронта зоны запняения

$$r_1 = [r_0^2 + c_1 q t / 2\pi l (1 - n_1)]^{1/2}, \quad r_2 = [r_1^2 + c_2 q t / 2\pi l (1 - n_2)]^{1/2}. \quad (12)$$

Из выражения (11) относительное значение перепада давления на фильтре будет

$$\overline{\Delta p} = \frac{q\mu}{2\pi l p_0} (\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4), \quad \zeta_i = \frac{1}{k_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}, \quad (13)$$

где в скобке первый член является гидравлическим сопротивлением фильтрующего элемента, второй и третий—соответственно незапняющей и запняющей частей фильтрующего материала, четвертый—осадка.

Рассмотрим процесс фильтрования при постоянном перепаде давления. В таком режиме фильтрования (4) заменяется условием

$$p_1(r, t) = p_2 = \text{const.} \quad (14)$$

Решая (1) при условиях (2)–(3) и (14), получаем

$$p_1 = p_0 + \frac{(p_2 - p_0)}{A(t)} \cdot \frac{1}{k_1} \ln \frac{r}{r_0}, \quad r_0 \leq r \leq r_1 \quad (15)$$

$$p_2 = p_0 + \frac{(p_2 - p_0)}{A(t)} \left( \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r}{r_1} \right), \quad r_1 \leq r \leq r_2, \quad (16)$$

$$p = p_0 + \frac{(p_* - p_0)}{A(t)} \left( \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_3} \ln \frac{r_3}{r_2} \right), \quad (17)$$

$$r_2 \leq r \leq r_3$$

$$p = p_0 + \frac{(p_* - p_0)}{A(t)} \left( \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_3} \ln \frac{r_3}{r_2} \right), \quad (18)$$

$$r_3 \leq r \leq r_4$$

где

$$A(t) = \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_3} \ln \frac{r_3}{r_2}.$$

Значение расхода фильтрации будет

$$q = 2\pi r_1 \frac{k_1}{\mu} \frac{\partial p_1(r_1, t)}{\partial r} = \frac{2\pi l (p_* - p_0)}{\mu A(t)} \quad (19)$$

В случае, когда имеем  $q = \text{const}$ , продолжительность фильтроцикла  $t_*$  лимитируется предельно-допустимым значением перепада давления  $\Delta \bar{p}_*$ . Задаваясь величиной  $\Delta \bar{p}_*$ , из уравнения (13) значение  $t_*$  определяется методом подбора. В случае, когда  $\Delta \bar{p} = \text{const}$ , значение  $t_*$  методом подбора определяется из (19) при допустимом минимальном значении  $q_*$ . В приведенных выражениях неизвестными являются пористость и проницаемость, определение которых возможно лишь опытным путем.

Для определения пористости  $n_i$  проводятся эксперименты с индикатором и определяется время контакта воды с фильтрующим слоем  $t_{ki}$ . По известному  $t_{ki}$  пористость фильтрующего  $i$ -ого слоя равна

$$n_i = q(t_{ki})/eL(r_i^2 - r_{i-1}^2). \quad (20)$$

Используя опытные данные о передаче давления в каждом фильтрующем слое, его проницаемость определяем следующим образом:

$$k_i = \frac{q^2}{2\pi l p_e \Delta \bar{p}_{r_{i-1}}} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} \quad (21)$$

Полученные зависимости позволяют произвести полный технологический расчет радиальных фильтров при очистке жидкости, содержащей взвешенные и эмульгированные вещества. Приведенные выше формулы позволяют получить решения многих частных задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Саркисян В. С., Читчан А. Ж., Саркисян А. А. Основные закономерности процесса осветления суспензий на водоочистных фильтрах // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1986.—Т. XXXIX, № 5.—С. 39—42.
2. Веригин Н. И. Метод расчета фильтров // Водоснабжение и санитарная техника.—1984.—№ 7.—С. 25—26.

УДК 532.517.3

А. А. САРУХАНИЯ

# К РАСЧЕТУ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ НЕСЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОМ НАПОРНОМ ДВИЖЕНИИ

Для расчета потерь энергии вязкой несжимаемой жидкости при плоскопараллельном напорном движении получена общая расчетная формула, которая применима как при нестационарном, так и при стационарном движении. Расчет потерь энергии по полученным формулам производится по закономерности распределения скоростей. Получена закономерность распределения скоростей при нестационарном движении для любого начального его распределения. Из полученных формул для любой практической задачи можно определить значение потерь энергии.

Ил. 1. Библиогр.: 4 назв.

Մտածելի անսկզբի շերտի զոգտվողական շարժման դեպքում էներգիայի կորուստների հաշվարկի համար ստացված է ընդհանուր բանաձև, որը սղտագործելի է կայունացված և չկայունացված շարժումների դեպքում: Էներգիայի կորուստի ստացված բանաձևով հաշվարկներ կատարելու համար անհրաժեշտ է ունենալ կենդանի կարվածքում արագության բաշխման օրինաչափությունը: Չկայունացված շարժման դեպքում ստացված է արագությունների բաշխման օրինաչափությունը, մուտքի կորվածքում նրա կամայական սկզբնական բաշխման դեպքում: Ստացված բանաձևերով կարելի է կամայական զործնական դեպքերի համար ստանալ էներգիայի կորուստի արժեքները:

Прикладное значение изучения нестационарных гидромеханических процессов связано с уточнением методики гидравлического расчета цилиндрических каналов различных систем. Цилиндрические каналы часто бывают прямоугольного поперечного сечения, где движение жидкости рассматривается как параллельное. Разработка методики расчета потерь энергии нестационарных потоков в таких каналах актуальна по прикладному значению. Расчет потерь энергии при нестационарных гидромеханических процессах для цилиндрических каналов круглого поперечного сечения производится с помощью нестационарных касательных напряжений на стенке неподвижного канала [1]. Однако потери энергии при нестационарном движении зависят не только от касательного напряжения на стенке неподвижного канала, а также от формы ииор распределения нестационарных скоростей по живому сечению.

Для вывода обобщенной формулы расчета потерь энергии при нестационарном ламинарном движении вязкой несжимаемой жидкости между двумя параллельными стенками, расположенными на расстоянии  $2h$ , выделим бесконечно малый объем жидкости в виде плоского слоя толщиной  $dy$  и длиной  $dx$  (рис.).

Уравнение движения выделенного элемента будет

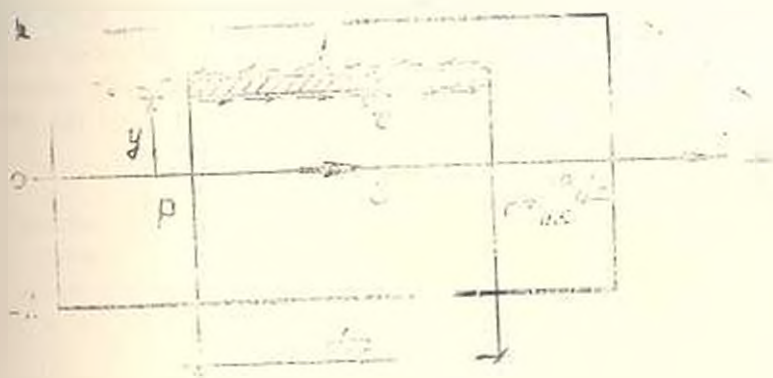
$$\frac{dU}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (1)$$

Силы трения, действующие на боковые поверхности жидкого элемента, выполняют работу

$$d\mathfrak{D} = l d\Gamma = l \frac{\partial \tau}{\partial y} dx dy, \quad (2)$$

где  $l$  — длина пути перемещения. Эта работа затрачивается для преодоления силы сопротивления жидкого элемента массой  $dm$ . Потери удельной энергии для данной трубки тока на пути  $l$  будут

$$dh_w^0 = \frac{d\mathfrak{D}}{g dm} = \frac{l}{2h\rho g v} \int_{-h}^{+h} U \frac{\partial \tau}{\partial y} dy, \quad (3)$$



Потери энергии жидкости, проходящие по живому сечению потока за единицу времени, составляют

$$\mathfrak{D} = l \int_{-h}^{+h} U \frac{\partial \tau}{\partial y} dy, \quad (4)$$

а среднее значение потерь удельной энергии потока

$$h_w = \frac{\mathfrak{D}}{g m} = \frac{l v}{2h\rho g v} \int_{-h}^{+h} U \frac{\partial U^2}{\partial y^2} dy. \quad (5)$$

Из уравнения движения (1) получим уравнение одномерного неуставившегося движения в виде

$$h_w = \frac{l}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{l}{g} \left( v \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{ds}{dt} \right), \quad (6)$$

где

$$\bar{s} = \frac{\int_{-h}^{+h} u^2 dy}{2v^2 h}, \quad \bar{v} = \frac{\int_{-h}^{+h} U dy}{2h}, \quad (7)$$

Формулу (6) можно считать общей для расчета потерь энергии вязкой жидкостью в цилиндрических каналах. Однако, при этом необходимо учитывать зависимость измеренной средней скорости потока  $v$  и коэффициента количества движения  $\beta$ .

Рассмотрим нестационарное ламинарное движение несжимаемой жидкости между двумя параллельными стенками, расстояние между которыми равно  $2h$ . Начальный участок или участок формирования потока по длине трубы примем конечной длины и рассмотрим движение в стабилизированном участке. Принимая движение осесимметричным, изотермическим и пренебрегая массовыми силами, система уравнений Навье-Стокса при этом примет вид [2, 4]

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

Из системы (8) следует, что давление в каждом фиксированном живом сечении не изменяется вдоль координат  $y, z$  и зависит только от переменной  $t$ , т. е.

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = f(t). \quad (9)$$

Предположим, что в начале неустойчивившегося процесса жидкость имеет начальное распределение скоростей по живому сечению  $\varphi(y)$ . При этих условиях задача изучения неустойчивившегося движения несжимаемой жидкости в плоской трубе сводится к решению дифференциального уравнения

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} = f(t) + \nu \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \quad (10)$$

при следующих краевых условиях:

$$\begin{aligned} U_x(y, t) &= 0 \quad \text{при } y = \pm h, \quad t > 0; \\ U_x(y, t) &= \varphi(y) \quad \text{при } t = 0, \quad (-h < y < +h). \end{aligned} \quad (11)$$

Решение уравнения (10) при условиях (11) будем искать в виде суммы двух функций [3]

$$U_x(y, t) = U_1(y, t) + U_2(y, t). \quad (12)$$

Функцию  $U_1(y, t)$  выберем так, чтобы она удовлетворяла однородному уравнению

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2}, \quad (13)$$

и условиям

$$\begin{aligned} U_1(y, t) &= 0 \quad \text{при } y = \pm h, \quad t > 0, \\ U_1(y, t) &= \varphi(y) \quad \text{при } t = 0, \quad (-h < y < +h). \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда функция  $U_1(y, t)$  должна удовлетворять неоднородному уравнению

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} = f(t) + \nu \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2} \quad (15)$$

и нулевым начальным и краевым условиям

$$U_1(y, t) = 0 \quad \text{при} \quad y = -h, \quad t > 0, \quad (16)$$

$$U_2(y, t) = 0 \quad \text{при} \quad t = 0, \quad (-h < y < +h).$$

При таком выборе функции  $U_1$  и  $U_2$  их сумма будет искомым решением задачи [3].

Функция  $U_1(y, t)$  описывает нестационарные движения жидкости, происходящие только вследствие придания отклонения скоростей от стационарного распределения, а функция  $U_2(y, t)$  — вынужденные нестационарные движения вследствие действия перепада давления при отсутствии начальных возмущений.

Решение однородного уравнения (13) при краевых условиях (14) имеет вид [3]

$$U_1(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin \frac{\pi k y}{h} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \nu}{h^2} t}, \quad (17)$$

где

$$C_k = \frac{1}{h} \int_{-h}^{+h} \varphi(y) \cdot \sin \frac{\pi k y}{h} \cdot dy. \quad (18)$$

Функцию  $U_2(y, t)$  найдем в виде ряда по собственным функциям  $\sin \frac{\pi k y}{h}$  однородной задачи

$$U_2(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k(t) \cdot \sin \frac{\pi k y}{h} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \nu}{h^2} t}. \quad (19)$$

Функция  $U_2(y, t)$  в виде (19) удовлетворяет всем краевым условиям задачи. Подставляя значение  $U_2(y, t)$  из (19) в уравнение (15) получаем соотношение

$$\sum_{k=1}^{\infty} \dot{b}_k(t) \cdot \sin \frac{\pi k y}{h} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \nu}{h^2} t} = f(t). \quad (20)$$

Разложим теперь функцию  $f(t)$  в интервале  $(-h, +h)$  в ряд по синусам и получим

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_k(t) \cdot \sin \frac{\pi k y}{h},$$

где

$$\tau_k(t) = \frac{2}{h} \int_{-h}^{+h} f(t) \cdot \sin \frac{\pi k y}{h} \cdot dy.$$

Из последнего соотношения получается, что при  $k = 2n$ ,  $\gamma_{2n} = 0$ , и  $k = 2n + 1$ ,  $\gamma_{2n+1} = -\frac{4f(t)}{(2n+1)\pi}$ . Следовательно, для определения коэффициентов  $b_k(t)$  получаем линейное дифференциальное уравнение только при нечетных значениях чисел  $k$

$$b_{2n+1}(t) \cdot e^{-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{h^2}t} = -f(t) \frac{4}{(2n+1)\pi},$$

откуда

$$b_{2n+1}(t) = -\frac{4}{\pi(2n+1)} [F(t) - F(0)],$$

где

$$F(t) = \int_0^t f(t) e^{-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{h^2}t} dt.$$

Таким образом, общее решение задачи неустойчившегося ламинарного движения между двумя параллельными стенками будет

$$U_T(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ C_k - \frac{4[F(t) - F(0)]}{\pi(2k+1)} \right] \sin \frac{\pi ky}{h} e^{-\frac{\pi^2 k^2}{h^2}t}. \quad (21)$$

Общее решение задачи дает возможность получить расчетные формулы для практических задач напорного неустойчившегося ламинарного плоскопараллельного движения. По заданным краевым условиям практической задачи определяется закон распределения скоростей (21) и соответствующий при этом коэффициент количества движения  $\beta$  и потеря энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А. И. Нестационарные гидромеханические процессы — М.: Машиностроение, 1982.—240 с.
2. Тарг С. М. Основные задачи теории ламинарных течений.—М.—Л.: Изд-во тех. лит., 1951.—420 с.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнение математической физики.—М.: Наука, 1977.—735 с.
4. Слескин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости.—М.: Изд-во тех. лит., 1955.—519 с.

ЕрПН

20 III 1990

УДК 624.131.526

С. Ш. НУРИДЖАНЫН

УЧЕТ НАЧАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА НАПОРА  
В МЕТОДЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО СЛОЯ ГРУНТА

Предлагается метод прогнозирования осадок фундаментов во времени по теории консолидации с учетом начального градиента напора. Расчетные зависимости получены в простой форме и не требуют применения ЭВМ для получения численных результатов.

Ил. 1. Библиогр. 3 назв.

Առաջարկվում է մոմանակի ցնթացում հիմքերի նստումների կանխագուշակման եղանակը ամրագրված տեսության հիման վրա՝ հաշվի առնելով նշման փոքրեական գրավիտացիոն ճնշման և սկզբնական ճնշման տարբերությունները ստացված են պարզ տեսքով և թվային արդյունքներ ստանալու համար չի պահանջվում հաշվի մեքենաների կիրառում:

Как известно, метод эквивалентного слоя, предложенный проф. Н. А. Цытовичем в 1934 г. для определения величины конечной осадки фундамента, в дальнейшем им и другими авторами был усовершенствован. С помощью этого метода оказалось возможным прогнозирование протекания осадки во времени для фундаментов, расположенных на водонасыщенных грунтах, путем приведения сложной пространственной задачи консолидации к одномерной. При рассмотрении одномерной задачи энкура уплотняющихся напряжений принимается в виде треугольника, высота которого  $h$  определяется из условия равенства стабилизированной осадки ее величине, полученной по строгому решению на базе теории линейно-деформируемой среды

$$h = 2a, \quad h_x = \lambda ab, \quad \lambda = (1 - \nu_0^2)/(1 - 2\nu_0), \quad (1)$$

где  $h$  — толщина эквивалентного слоя,  $\nu_0$  — коэффициент Пуассона,  $b$  — ширина подошвы фундамента,  $\lambda$  — коэффициент, зависящий от формы фундамента в плане и от его жесткости, значения которого можно найти в [1]. Зная величину  $h$ , значение стабилизированной осадки можно определить по формуле  $S = m_0 q h$ , где  $m_0$  — коэффициент относительной сжимаемости,  $q$  — интенсивность внешней нагрузки.

Если основанием является водонасыщенный глинистый грунт, то для прогнозирования осадки фундамента во времени можно использовать приведенные в [1] решения. Однако в случае, когда фильтрация протекает с отклонением от закона Дарси из-за наличия начального градиента напора эти решения не могут быть использованы. Учет начального градиента напора при прогнозировании консолидации является обязательным, т. к. он не только влияет на величину конечной осадки, но и на скорость протекания процесса. Ниже предлагается простой инженерный способ учета начального градиента

напора в методе эквивалентного слоя грунта путем применения интегрального метода, использованного ранее в [2], применительно к одномерной задаче консолидации при прямоугольной эпюре сжимающих напряжений.

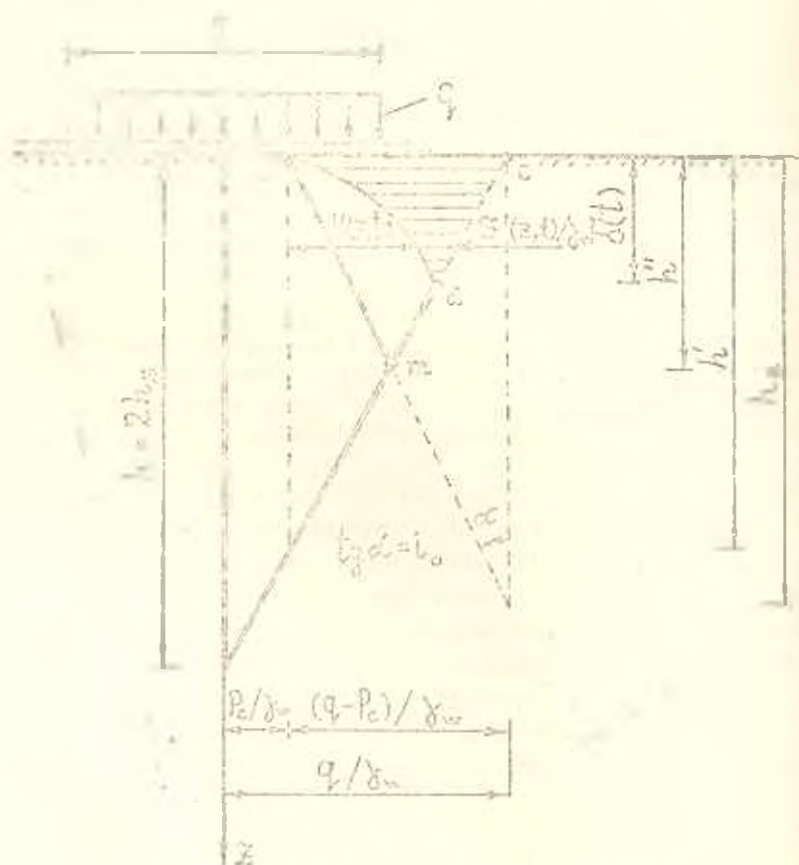


Рис. Расчетная схема

Рассмотрим консолидацию водонасыщенного глинистого грунта под воздействием равномерно распределенной по площади прямой угольной нагрузки интенсивностью  $q$  (рис.). Если грунт обладает структурной прочностью, то при мгновенном приложении внешней нагрузки часть ее, равная  $P_0$ , будет воспринята скелетом грунта, а остальная часть будет передана порочной воде. При этом глубина активной зоны будет равна  $h = 2h_0(q - P_0)/q$ . Если же фильтрация в грунте начинается при градиентах, больших начального ( $i > i_0 = i_{00}$ ), то глубина активной зоны уменьшится до величины  $h' = h_0(h - h_0)$ , где  $h_0 = (q - P_0)/\gamma_w l_0 q \gamma_x l_0$ .

Таким образом, пропозирование консолидации по методу эквивалентного слоя грунта с учетом начального градиента напора сводится к интегрированию уравнения

$$\frac{\partial H}{\partial t} = (1 - m_v \gamma_w) \sigma (k \frac{\partial H}{\partial z} - i_0) \frac{\partial z}{\partial z}.$$

которое при постоянном коэффициенте фильтрации  $k$  запишется в виде

$$\partial H / \partial t = C_v \partial^2 H / \partial z^2; \quad C_v = k m \gamma_w \gamma_s \quad (2)$$

Здесь  $H(z, t) = (q_0 - z(z, t)) \gamma_s$ , а  $z(z, t)$  — напряжение, возникающее в скелете грунта (сверху  $P_p$ ), под воздействием которого происходит уплотнение. Решение уравнения (2) должно быть найдено при краевых условиях

$$H(z, 0) = q_0(1 - z/h) \gamma_s, \quad H_0(1 - z/h), \quad z < h, \quad (3)$$

$$H(0, t) = 0, \quad H(z(t), t) = H_0(1 - z(t)/h), \quad \partial H(z(t), t) / \partial z = -1. \quad (4)$$

Последние два условия заданы на движущейся границе  $z(t)$ , закон движения которой заранее неизвестен и должен быть найден из самого решения. Впервые постановка двух граничных условий на движущейся границе раздела, разделяющей область, в которой происходит фильтрация, от области, в которой она отсутствует, была дана в [3]. Для удобства перейдем к безразмерным переменным, вводя обозначения

$$\tau = t C_v h^2, \quad \xi = z/h, \quad \bar{H} = H/H_0, \quad \bar{h} = h/h_0, \quad \xi(\tau) = z(t)/h_0.$$

Тогда задача (2) — (4) запишется в виде

$$\partial \bar{H} / \partial \tau = \partial^2 \bar{H} / \partial \xi^2, \quad (5)$$

$$\bar{H}(\xi, 0) = 1 - \xi/\bar{h}, \quad \bar{H}(0, \tau) = 0, \quad (6)$$

$$\bar{H}(\xi(\tau), \tau) = 1 - \xi(\tau)/\bar{h}, \quad \partial \bar{H}(\xi(\tau), \tau) / \partial \xi = -1.$$

Функцию  $\bar{H}(\xi, \tau)$  примем в виде

$$\bar{H}(\xi, \tau) = a_0(\tau) + a_1(\tau)\xi + a_2(\tau)\xi^2.$$

Найдя неизвестные коэффициенты  $a_i(\tau)$  путем удовлетворения трем граничным условиям, получим

$$\bar{H}(\xi, \tau) = [2 - \xi(\tau) - 2\xi(\tau)/\bar{h}]\xi^2 + [\xi(\tau) - 1 + \xi(\tau)/\bar{h}]\xi^3 \xi(\tau). \quad (7)$$

Пусть функция  $\bar{H}$  удовлетворяет уравнению (5) в среднем от  $\xi = 0$  до  $\xi = \xi(\tau)$  тогда

$$\int_0^{\xi(\tau)} (\partial \bar{H} / \partial \tau) d\xi = \int_0^{\xi(\tau)} (\partial^2 \bar{H} / \partial \xi^2) d\xi. \quad (8)$$

Подставив (7) в (8) после интегрирования, получим обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка

$$\frac{d\xi(\tau)}{d\tau} = \frac{6(n - \xi(\tau))}{(n + \xi(\tau))\xi(\tau)}, \quad n = \bar{h}/(1 + \bar{h})$$

Разделив переменные и проинтегрировав с учетом начального условия  $\xi(0) = 0$ , найдем

$$\tau = -\frac{n}{3} \left[ (1 + \xi(\tau)/4n) \xi(\tau) - n \ln | \xi(\tau) n + 1 | \right]. \quad (9)$$

Таким образом, в неявном виде найдена зависимость приведенной глубины поверхности раздела  $\xi$  от времени.

Величина осадки в произвольный момент времени будет пропорциональна площади криволинейной фигуры «acd», т. е.

$$S(\tau) = m_p \int_0^{\xi(\tau)} z(z, t) dz = m_p \gamma_w H_a h_a \int_0^{\xi(\tau)} [1 - \xi/h - H(\xi, \tau)] d\xi.$$

Учитывая, что величина стабилизированной осадки  $S_*$  пропорциональна площади треугольника «ast» и равна  $S_* = m_p^2 \gamma_w H_a h_a n/2$ , степень консолидации  $Q(\tau)$  получим в виде

$$Q(\tau) = S(\tau)/S_* = (2/n) \int_0^{\xi(\tau)} [1 - \xi/h - H(\xi, \tau)] d\xi.$$

Подставив сюда выражение (7), после интегрирования найдем

$$Q(\tau) = \xi(\tau) (2 + \xi(\tau)/n) / 3n. \quad (10)$$

В частном случае, при  $n=1$  получается решение для прямоугольной эпюры уплотняющих напряжений, которое было найдено ранее в [2].

Примененный в данном случае интегральный метод, как это показано в [2], приводит к результатам, незначительно отличающимся (в пределах нескольких процентов) от найденных численным методом. А если учесть, что численное решение задачи с использованием ЭВМ связано с довольно значительными затратами машинного времени, удобство применения полученных простых выражений (9) и (10) на практике не вызывает сомнений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цытович Н. А. Механика грунтов.—М.: Высшая школа, 1983.—288 с.
2. Нипиджанян С. Ш., Хачатрян Э. А. Влияние начального градиента напора на процесс консолидации//Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1983—Т. XXXV, № 5—С. 22—25.
3. Флорин В. А. Основы механики грунтов.—М.—Л.: Гостройиздат, 1961, т. 2.—543 с.

Э. А. ХАЧАТРЯН

# ПРОГНОЗ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На ЭВМ создана математическая модель гидрогеологической обстановки всей Араратской равнины. На этой модели дается прогноз подземных вод в основных водоносных горизонтах с учетом влияния внешних факторов. Полученные результаты дают возможность установить мелиоративное состояние орошаемых земель и при необходимости изметить инженерные мероприятия по регулированию режима подземных вод.

Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.: 2 назв.

ՀՀ-ի օգնությանը համապատասխան է ամբողջ Արարատյան դաշտի հիդրոգեոլոգիական պայմանները մաթեմատիկական մոդելը: Մոդելը օգնությանը տրվում է հիմնական ջրատար շերտերում ստորգետնյա ջրերի ուժի միջին կանխադրումներով: Փայլի առնելով արտաքին գործոնները, մոդելովում որոշվում են հնարավորությունն և ասարի կողմից հողափայտի միջավայրի վիճակը և անհրաժեշտության դեպքում անհրաժեշտ ինժեներական միջոցառումներ ստորգետնյա ջրերի ուժի միջին կանխադրումներով համար:

В связи с интенсификацией сельскохозяйственного производства республики резко возрастают масштабы водопотребления. Значительным резервом для обеспечения водными ресурсами народного хозяйства республики, в частности, орошаемого земледелия являются подземные воды артезианского бассейна Араратской равнины.

Балансовые расчеты показывают, что интенсивное использование подземных вод равнины может привести к нарушению водного баланса, расходованию невосполнимых запасов и их загрязнению. В настоящее время воды артезианского бассейна используются для орошения, водоснабжения и коммунальных нужд. Отбор воды из различных водоносных горизонтов осуществляется 915 артезианскими и 1190 грунтовыми с механической откачкой колодцами вертикального дренажа с потенциальным дебитом более 50 м<sup>3</sup>/с.

В лаборатории математического моделирования кафедры ГТС ЕРАСН создана постоянно действующая математическая модель подземного бассейна Араратской равнины с целью научно-обоснованного управления и прогнозирования водно-солевого режима подземных вод. На модели решается следующий взаимосвязанный комплекс проблем:

1. Условия формирования водно-солевого режима подземных вод в зависимости от почвенно-мелиоративной и экологической обстановки равнины. Выявление основных факторов, лимитирующих почвенно-мелиоративные условия.

2. Исследование движения инфильтрационных вод из области формирования, управление их режимами пополнения и перехвата под-

земных вод на более высоких отметках предгорной части возвышенностей рек равнины.

3. Анализ и оценка влияния антропогенной деятельности на режим подземных вод равнины.

4. Перерегулирование и рациональное использование подземных вод равнины с определением их динамических и эксплуатационных запасов.

5. Прогноз гидродинамического режима подземных вод, мелиоративного состояния орошаемых земель при поэтапном осуществлении водохозяйственных, гидромелиоративных и других инженерных мероприятий с учетом природоохранных концепций.

6. Прогноз гидрохимического (солевого) режима подземных вод.

В основу модели положены природные, геолого-гидрогеологические и почвенномелиоративные условия равнины.

В результате схематизации гидрогеологической обстановки территории, расчетная схема равнины представлена в общем случае из пяти гидрогеологических разностей: I—однослойная, II—двухслойная, III—трехслойная, IV—четырёхслойная, V—пятислойная (рис. 1, 2). Все они связаны между собой соответствующими граничными условиями (ГУ IV рода).

Режимы фильтрации для схем, приведенных на рис. 2, могут быть описаны следующими математическими моделями в виде дифференциальных уравнений [1, 2]:

для однослойной фильтрационной среды (рис. 2, а) —

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(h - T_1) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(h - T_1) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \\ + W(x, y, t) - Q_1(x, y, t) = \mu_0 \frac{\partial h}{\partial t}; \quad (1)$$

для двухслойной фильтрационной среды (рис. 2, б) —

$$W(x, y, t) + \frac{k_0}{h - T_2} (H_1 - h) = \mu_0 \frac{\partial h}{\partial t}, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ (km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial y} \right] - \\ - \frac{k_{02}}{h - T_2} (H_1 - h) - Q_1(x, y, t) = \mu_1 \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad (2)$$

для трехслойной фильтрационной среды (рис. 2, в) —

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(h - T_1) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(h - T_1) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \\ + \frac{k_{02}}{T_2 - T_3} (H_1 - H_2) + W = \mu_0 \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (3)$$



Рис. 1. Схематическая карта гидрогеологической обстановки разницы и схема масса на блоки.

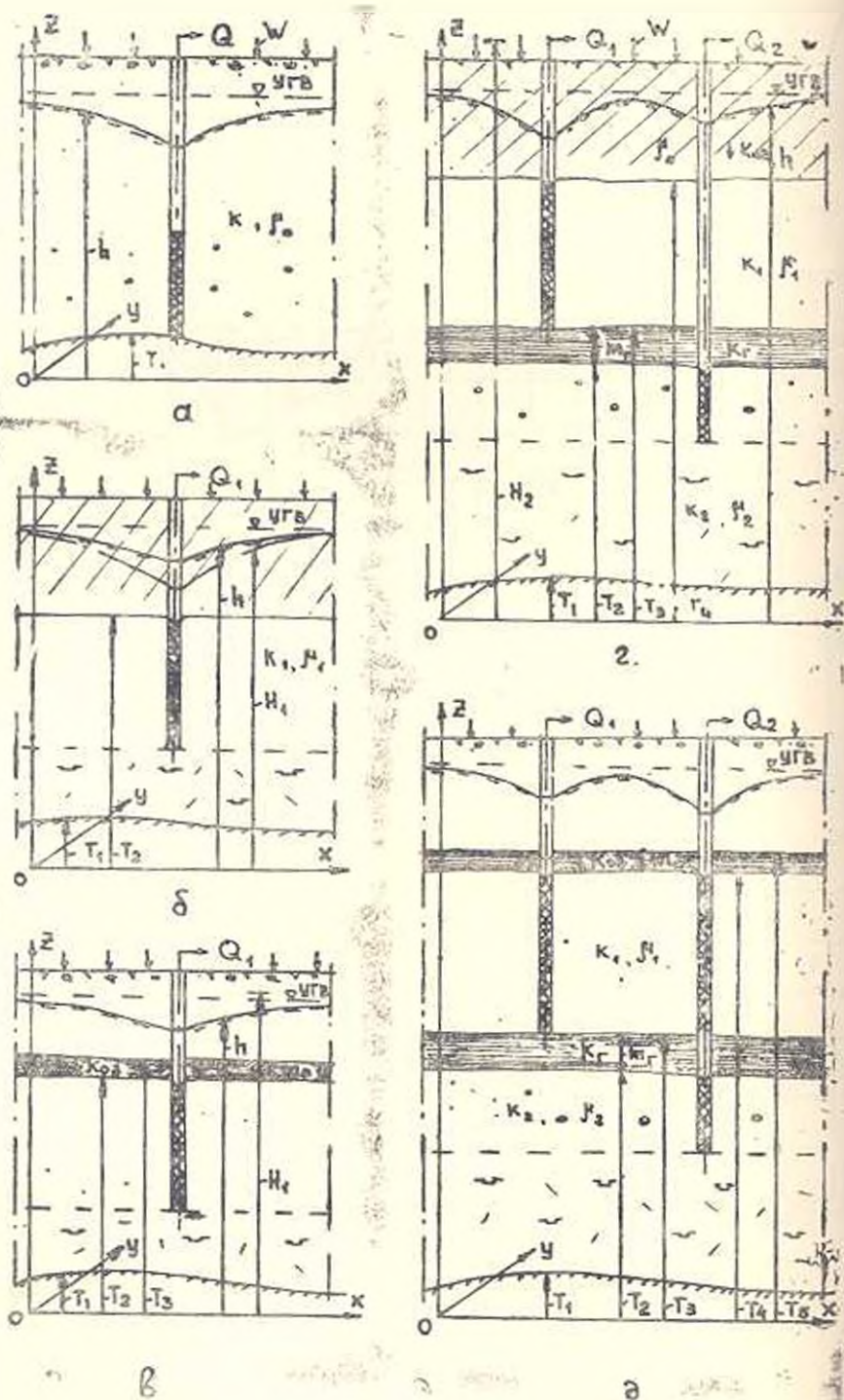


Рис. 2. Расчетные схемы водоносных слоев.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial y} \right] - \frac{k_{02}}{T_2 - T_1} (H_1 - h) - Q_1 = \mu_1 \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad (3)$$

для четырехслойной фильтрационной среды (рис. 2, з) —

$$W(x, y, t) = \frac{k_{02}}{h - T_1} (H_1 - h) = \mu_0 \frac{\partial h}{\partial t},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[ (km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial y} \right] - \frac{k_{02}}{h - T_1} (H_1 - h) + \\ + \frac{k_1}{m_1} (H_1 - H_2) - Q_1 = \mu_1 \frac{\partial H_1}{\partial t}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[ (km)_2 \frac{\partial H_2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (km)_2 \frac{\partial H_2}{\partial y} \right] - \\ - \frac{k_1}{m_1} (H_2 - H_1) - Q_2 = \mu_2 \frac{\partial H_2}{\partial t}; \end{aligned}$$

для пятислойной фильтрационной среды (рис. 2, д) —

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[ k(h - T_1) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(h - T_1) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \\ + \frac{k_{02}}{T_2 - T_1} (H_1 - h) + W = \mu_0 \frac{\partial h}{\partial t}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[ (km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial y} \right] - \frac{k_{02}}{T_2 - T_1} (H_1 - h) + \\ + \frac{k_1}{m_1} (H_2 - H_1) - Q_1 = \mu_1 \frac{\partial H_1}{\partial t}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (km)_2 \frac{\partial H_2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (km)_2 \frac{\partial H_2}{\partial y} \right] - \frac{k_1}{m_1} (H_1 - H_2) - Q_2 = \mu_2 \frac{\partial H_2}{\partial t}.$$

В уравнениях приняты следующие обозначения:  $h(x, y, t)$ ,  $H_1(x, y, t)$  и  $H_2(x, y, t)$  — соответствующие отметки уровня грунтовых вод в покровном слое и напоры в слабо- и сильнонапорном слоях, в точке  $(x, y)$  в момент времени  $t$ , отсчитываемые от некоторой плоскости отсчета;  $k$  — коэффициент фильтрации верхней хорошо-проницаемой части покровного слоя;  $k_1$ ,  $m_1$  — коэффициент фильтрации и мощность нижней слабопроницаемой части покровного слоя;  $\mu_0$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  — коэффициенты гравитационной и упругой подотдачи соответственно покровного, слабо- и сильнонапорного слоев;  $k_0$ ,  $\mu_0$  — коэффициент фильтрации и мощность озерных глин;  $Q_1(x, y, t)$  — дебит скважин, действующих в слабонапорном слое;  $W(x, y, t)$  — сум-

марная величина интенсивности питания грунтовых вод инфильтрационными водами. Интенсивность испарения принималась зависящей от уровня грунтовых вод и аппроксимировалась зависимостью Г. Г. Пахчаняна

$$F = (E_0 - A) \exp(-\alpha(m - h)), \quad (6)$$

где  $E_0$  — максимальная величина испарения с поверхности почвы, атмосферные осадки,  $\alpha$  — коэффициент, который определяется на основании режимных наблюдений,  $m$  — вертикальная координата поверхности земли.

Уравнения системы (1)–(5) выражают условия водного баланса в соответствующих водоносных горизонтах и решаются при следующих краевых условиях:

$$t = 0, \quad h = h_0(0, x, y), \quad H_1 = H_{1r}(0, x, y), \quad H_2 = H_{2r}(0, x, y); \quad (7)$$

$$t > 0, \quad h = h_1(x, y, t), \quad H_1 = H_{1r}(x, y, t), \quad H_2 = H_{2r}(x, y, t); \quad (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial n} = \frac{\partial H_1}{\partial n} = \frac{\partial H_2}{\partial n} = 0. \quad (9)$$

Начальное положение депрессионной поверхности грунтовых и напорных вод в области фильтрации было взято с карт гидроизогипс и пьезоизогипс на январь месяц 1990 г., составленных Гидрогеологическо-геоморфологической экспедицией ММВХ. Граничные условия заданы в соответствии с материалами плана Армгидропроводхоз и Геологического управления. Граничное условие типа (8) принималось в местах притока и оттока подземных вод (рис. 1), а (9) — на остальных участках.

Системы уравнений (1)–(5) при принятых условиях решаем методом конечных разностей. Для этого область фильтрации  $D$  вместе с границей  $\Gamma$  покроем равномерной сеткой с шагом  $\Delta x = \Delta y = 4000$  м. Шаг по времени принят  $\Delta t = 30$  сут. Решение уравнений произведено методом итерации Зейделя по программе на языке ФОРТРАН-IV для ЭВМ СМ-4.

В результате расчетов были найдены значения  $h_{i,j,t}$ ,  $H_{1,i,j,t}$ ,  $H_{2,i,j,t}$  для узлов равномерной сетки, аппроксимирующей исследуемую территорию. По полученным значениям  $h_{i,j,t}$ ,  $H_{1,i,j,t}$  на отдельных участках были решены обратная задача теории фильтрации [1]. После уточнения параметров решалась прямая задача. Был выполнен прогноз на три года (1990–1992 гг.). В таблице показаны полученные значения уровня  $h$  и напоров  $H_1$ ,  $H_2$  для 1991 г. в некоторых узлах сетки.

По полученным результатам моделирования составлены прогнозные карты глубин залегания грунтовых вод (гидроизогипсы) и пьезоизогипсы, выделены массивы, подлежащие искусственному дренажированию, и площади, где дальнейшая откачка подземных вод приведет к осушению и просадкам территорий.

| Месцы | Координаты |       |                |        |                |                |
|-------|------------|-------|----------------|--------|----------------|----------------|
|       | (2×6)      | (4×1) |                | (6×11) |                |                |
|       | Напоры, м  |       |                |        |                |                |
|       | h          | h     | H <sub>1</sub> | h      | H <sub>1</sub> | H <sub>2</sub> |
| I     | 912,6      | 857,0 | 853,3          | 855,8  | 826,0          | 822,8          |
| II    | 919,1      | 853,3 | 853,7          | 855,3  | 825,0          | 822,6          |
| III   | 915,6      | 853,0 | 854,1          | 855,0  | 825,1          | 822,7          |
| IV    | 918,4      | 854,0 | 853,9          | 856,1  | 826,2          | 822,5          |
| V     | 918,2      | 851,4 | 851,3          | 856,4  | 826,4          | 830,7          |
| VI    | 918,6      | 854,0 | 854,1          | 856,1  | 826,6          | 828,5          |
| VII   | 919,4      | 855,2 | 849,1          | 857,0  | 827,1          | 826,0          |
| VIII  | 919,9      | 855,5 | 850,5          | 857,3  | 827,6          | 824,1          |
| IX    | 921,2      | 855,6 | 850,1          | 857,5  | 827,8          | 823,8          |
| X     | 920,7      | 855,8 | 852,7          | 857,5  | 827,8          | 826,1          |
| XI    | 920,7      | 855,8 | 853,1          | 857,5  | 827,8          | 825,5          |
| XII   | 919,3      | 855,9 | 853,1          | 857,6  | 827,8          | 852,8          |

Таким образом, в условиях интенсивного развития орошаемого земледелия действующая математическая модель позволяет с достаточной точностью наметить практические мероприятия, направленные на улучшение мелиоративного состояния земель.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатрян Э. А., Хачатурян Г. Т., Аниани С. А. Проток динамики подземных вод в многополюсной фильтриционной среде // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1984.—Т. XXXVII, № 1.—С. 31—35.
2. Хачатрян Э. А., Хачатурян Г. Т., Багдасарян А. Б. Гидрофильтрация из водохранилища методом математического моделирования // Гидротехническое строительство.—1984.—№ 2.—С. 21—25.

ЕрПН

13. XII 1990

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 5—6, 1991, с. 255—259.

#### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 50.53.19

С. С. АГАЯН, Р. Р. ПОЛЬБУДАГЯН

#### ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЛС ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ДВУХПОЛЮСНИКОМ

Рассматривается динамическая модель описания автоколебательных процессов в нелинейных неконсервативных системах, примерами которых являются электрические

ские цепи LC с параллельно и последовательно подсоединенным нелинейным двухполюсником. Предложен алгоритм вычисления периодов и амплитуд возникающих релаксационных автоколебаний в данных системах. Модель апробирована на электрических цепях LC с параллельно подсоединенным туннельным переключающим диодом.

Ил. 1. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

Գրության համաձայնում է:  $\alpha$  — պահպանողական,  $\sigma$  — դաշտի LC շրջանի և հալորդական միջավայրի էլեկտրական շղթաներում ինքնատատանողական պրոցեսները բնութագրող գերադասության մոդուլ: Առաջարկվում է ապոսիթի տրամաշաճակարգերում առաջացող ռելաքսացիոն ինքնատատանումների պարբերությունների և ամպլիտուդների հաշվման համար Տրված մոդելի փորձարկում է առկա հենարանային թուելային փոխակապի: Գրողի էլեկտրական LC շղթաների վրա:

Рассмотрим электрическую цепь LC с параллельно и последовательно подсоединенным двухполюсником. В качестве двухполюсника могут быть использованы германиевые туннельные усилительные и переключающие диоды и др.

LC контуры с двухполюсником подробно изучены в [1—3]. Одним из основных параметров, характеризующих LC электрические цепи с двухполюсником, является вольт-амперная характеристика двухполюсника, которая в указанных работах не всегда полно и точно описывается. В работе [4] моделирование вольт-амперной характеристики двухполюсника основывается на аппроксимации последней с помощью функции без рассмотрения двухполюсника в LC цепи.

В данной работе предлагается параметрическое представление вольт-амперной характеристики двухполюсника, что приводит к изучению новой динамической модели описания нелинейных электрических цепей с двухполюсником. Предлагаются алгоритмы нахождения периодов и амплитуд возникающих релаксационных колебаний в электрической цепи с параллельно и последовательно подсоединенным нелинейным двухполюсником.

Пусть  $L$  — индуктивность  $C$  — емкость,  $x$  — сила тока при последовательно подсоединенном двухполюснике  $S$  — типа. Вольт-амперная характеристика двухполюсника определяется соотношением следующего вида:

$$y\left(x, l, \frac{l}{C}\right) = -x \cdot \sqrt{\frac{l}{C}} x^{2l+1}, \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Можно показать, что динамическая модель электрической цепи с параллельно и последовательно подсоединенным двухполюсником без внешнего источника имеет вид

$$\frac{dx}{dt} = \left( (2l-1)x^{2l} - \sqrt{\frac{l}{C}} \right) \frac{dx}{x} \quad x \neq 0, \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Отметим, что при значении  $l = 1$  модель (2) совпадает с моделью Ван-дер Поля [5], а вольт-амперная характеристика  $y\left(x, l, \frac{l}{C}\right)$  — характеристикой  $y\left(x, 1, \frac{l}{C}\right)$ , предложенной в [5].

Перейдем к изучению модели (2) и рассмотрим случай  $L \gg C$ . Доказана справедливость следующего утверждения: если в электрической цепи  $LC$  с параллельным и последовательным подсоединением двухполюсника индуктивность намного больше емкости ( $L \gg C$ ), то в этих цепях:

а) появляются релаксационные колебания тока с последовательно подсоединенным двухполюсником или релаксационные колебания напряжения с параллельно подсоединенным двухполюсником, период которых определяется выражением

$$T\left(l, \frac{L}{C}\right) = \frac{2L}{C} \ln \left[ \frac{1}{(2l+1)^{1/l} a\left(l, \frac{L}{C}\right)} \left(\frac{L}{C}\right)^{1/l} \right] + \frac{2l+1}{(LC)^{1/l}} \left[ a^{2l} - \frac{1}{2l+1} \left(\frac{L}{C}\right)^{1/l} \right]; \quad (3)$$

б) предельное значение амплитуд релаксационных колебаний  $x\left(l, \frac{L}{C}\right)$  есть единственное положительное решение алгебраического выражения

$$x^{2l+1} - \sqrt{\frac{l}{C}} x - \frac{2l}{(2l+1)^{1/l+1/l}} \left(\frac{L}{C}\right)^{1/l+1/l} = 0. \quad (5)$$

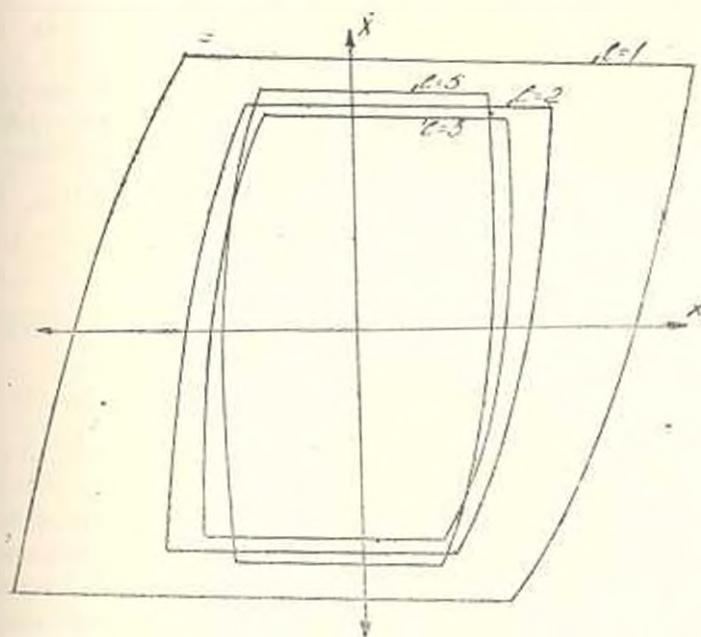


Рис. Предельные циклы в зависимости от значения параметра  $l$

Геометрический смысл параметра  $l$  проявляется на рисунке, где на соответствующей фазовой плоскости модели (2) ( $x, \dot{x}$ ) показаны предельные циклы для значений параметра  $l = 1, 2, 3, 5$ .

*Пример.* Рассмотрим германиевый туннельный переключательный диод, подсоединенный параллельно в электрическую цепь  $LC$ . Вольт-амперная характеристика туннельного диода определяется следующим образом:

$$y\left(x = x_0 + l, \frac{L}{C}\right) = -(x - x_0) + \sqrt{\frac{L}{C}} (x - x_0)^{2l+1} + y(x_0), \quad (5)$$

$$l = 1, 2, 3, \dots,$$

где  $x_0 = 125$ ,  $y(x_0) = 2,85$ .

Таблица

| $\sqrt{\frac{L}{C}}$ | 2222  |       |       | 999   |       |       | 100   |       |       | Эталон |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                      | 1     | 2     | 3     | 1     | 2     | 3     | 1     | 2     | 3     |        |
| $x_0$ , мВ           | 97,0  | 120,0 | 122,0 | 103,0 | 121,0 | 122,0 | 119,0 | 122,0 | 123,0 | 85,0   |
| $y_{\max}$ , мА      | 20,0  | 6,5   | 5,0   | 15,0  | 5,8   | 4,8   | 6,6   | 4,5   | 4,1   | 5,0    |
| $x_2$ , мВ           | 152,0 | 120,0 | 127,0 | 143,0 | 123,0 | 127,0 | 130,0 | 127,0 | 123,0 | 20,0   |
| $y_{\min}$ , мА      | 15,0  | -0,8  | 0,6   | -9,5  | -0,1  | -0,8  | -0,9  | 1,1   | 1,5   | 0,7    |

В таблице приведены эталонные значения  $x_0$ ,  $y_{\max}$ ,  $x_2$ ,  $y_{\min}$  и те же значения, вычисляемые в рамках данной модели при разных значениях величины  $\sqrt{\frac{L}{C}}$  и параметра  $l$ .

Варьируя значениями  $l$ ,  $L$  и  $C$ , появляется возможность достаточно полно и «точно» описать вольт-амперную характеристику указанных выше двухполюсников рассматриваемой электрической цепи.

В частности из таблицы следует, что а) значение  $y_{\max}$  удаляются от эталонного при  $l = 1$  и приближаются к нему при  $l = 2, 3$ , б) для значений  $x_2$  наблюдается обратная картина.

Далее отметим, что, а) чем больше  $\sqrt{\frac{L}{C}}$  тем точнее вычисляются значения  $T\left(l, \frac{L}{C}\right)$  в рамках данной модели, б) методами многокомпонентной оптимизации можно выбрать наилучшее приближение вольт-амперной характеристики в зависимости от  $l$ ,  $C$ ,  $L$  с ее значением, в) вольт-амперная характеристика туннельного диода деформируется при облучении. В зависимости от величины радиационного интегрального потока можно выбрать вольт-амперную характеристику диода, которая лучше описывается в рамках данной модели.

1. Хаслер В. В. и др. Основы теории колебаний.—М.: Наука, 1988.—391 с.
2. Хаслер М. Ж. Электрические схемы с хаотическим поведением//ТИИЭР.—1985.—Т. 75.—С. 40—54.
3. Сигурт Э. М. Цепи, сигналы, системы.—М.: Мир, 1988.—Т. 1.—336 с.
4. Абелин М. Л. О моделировании вольт-амперных характеристик гуппелевых диодов//Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1989.—Т. 12, № 2.—С. 92—95.
5. Лешинц С. Геометрическая теория дифференциальных уравнений.—М.: Физматгиз, 1961.—387 с.

ИИ АН Армении

29. IV. 1990

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 5—6, 1991, с. 259—263.

ГИДРАВЛИКА

УДК 532.517.3

А. А. САРУХАНИЯН

# НЕСТАЦИОНАРНОЕ ЛАМИНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Приводится теоретическое исследование структуры нестационарного течения вязко-пластичной жидкости при нестационарном движении вязко-пластичной жидкости в круглой цилиндрической трубе. Такое движение имеет место при течениях вязкопластичных растворов, а также при движении нефти по трубопроводам при температурах, близких к застыванию. Задача сводится к решению уравнения Лапласа-Вязкопластичности. Получено решение этого уравнения при произвольном несимметричном начальном распределении скоростей. Общее решение задачи представляется в виде сумм, членами которого являются комбинации полиномиальных функций.

Получено: 6 янв.

Մեր զննման խնդրանքը կոնստրուկտիվ է մաթեմատիկական հիմունքներով և ֆիզիկական ինտերպրետացիայով, որը տեղի ունի կապիտալ լուծարման և նստման շրջանի մոմենտներին հարկադիր բնորոշ է հեղուկ-կոմպոնենտի փոխանցման ինտերֆեյսում:

Ինտերֆեյսում է առաջին համարման ինտերֆեյսը արագորոշման և կոմպոնենտի փոխանցման անհրաժեշտագրաֆ բաժանման դեպքում մեղմոր ընդհանուր բնույթի ունենալով և տեղի տնտեսի, որի անդամները հստակապես են բնութագրվում համապատասխան և որ համապատասխան է առաջին համարման զորման և դեմոր առաջին լուծարման:

Задача изучения нестационарного ламинарного движения вязко-пластичной жидкости в круглой цилиндрической трубе имеет важное практическое значение, в частности, для расчета потерь напора, которые зависят от закона распределения скоростей по сечению трубы. Поэтому задача изучения нестационарного ламинарного движения сводится к определению закономерности изменения скоростей. Изучению этого вопроса посвящен ряд работ [1—7].

В [2] автор обобщает метод И. С. Громека и получает общее решение нестационарного ламинарного движения вязко-пластичной жидкости в круглой трубе. Однако, при решении задачи автор рассматривает

рания дифференциальные уравнения движения и полученные решения на всю внутреннюю область трубы, что не соответствует физическому явлению. Дифференциальные уравнения движения справедливы лишь для вязко-пластичной области течения ( $r_0 < r < R$ ).

В [4] автором получено решение задачи с учетом области определения дифференциальных уравнений движения. Однако изучен частный случай, когда по всей длине трубопровода действует постоянный перепад давления ( $\partial p / \partial x = \text{const}$ ). Определенный практически и теоретический интерес представляет изучение задачи для общего случая, когда начальные и граничные условия имеют общий вид.

Рассмотрим нестационарное ламинарное движение вязко-пластичной жидкости в круглой цилиндрической трубе. Будем считать, что движение стабилизированное и осесимметричное, т. е. жидкость имеет скорость только в осевом направлении. При этом

$$U_r = U_\theta = 0, \quad \frac{\partial U_z}{\partial \varphi} = 0 \quad (1)$$

и система дифференциальных уравнений движения вязко-пластичной жидкости будет [4]

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) = \frac{\nu}{r}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0 \quad \text{при} \quad r_0 < r < R, \quad (3)$$

где  $r_0$  — радиус ядра, определяемый из условия пластичности  $r_0 = \frac{2l_*}{\rho}$ ,  $R$  — внутренний радиус трубы.

Из (2) и (3) следует, что  $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$  зависит только от  $t$ :

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = f(t). \quad (4)$$

Для решения уравнения (2) начальные и граничные условия задаются в виде

$$U(R, t) = 0 \quad \text{при} \quad t > 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial U(r_0, t)}{\partial r} = 0 \quad \text{при} \quad t > 0, \quad (6)$$

$$U(r, 0) = \varphi(r) \quad \text{при} \quad r_0 < r < R, \quad t = 0, \quad (7)$$

где  $\varphi(r)$  — начальное распределение скоростей.

Такая постановка задачи соответствует структуре движения и физике явления. Введем новую переменную

$$U'(r, t) = U(r, t) - \varphi(r)$$

и тогда уравнение (2) примет вид

$$\frac{\partial v}{\partial t} = f(t) + v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \psi''(r) + \frac{v}{r} \psi'(r) - \frac{v_0}{r^2}. \quad (9)$$

Функцию  $\psi(r)$  выбираем так, чтобы удовлетворялось условие

$$\psi''(r) + \frac{1}{r} \psi'(r) - \frac{v_0}{r^2} = 0. \quad (10)$$

Граничные условия для функции  $\psi(r)$  получаем из (5), (6) и (8):

$$\psi(R) = 0, \quad \frac{\partial \psi(r_0)}{\partial r} = 0. \quad (11)$$

Дважды интегрируя уравнение (10) и определяя постоянные интегрирования, получаем

$$\psi(r) = \frac{v_0}{r^2} \left( r - R - r_0 \ln \frac{r}{R} \right). \quad (12)$$

Для функции  $v(z, t)$  получим краевую задачу — решить неоднородное уравнение

$$\frac{\partial v}{\partial t} = v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) + f(t) \quad (13)$$

при следующих граничных и начальных условиях:

$$v(R, t) = 0, \quad \frac{\partial v(r_0, t)}{\partial r} = 0 \quad \text{при } t \geq 0; \quad (14)$$

$$v(r, 0) = H(r) \quad \text{при } r_0 \leq r < R, \quad (15)$$

где  $H(r) = \varphi(r) - \frac{v_0}{r^2}(r)$ .

Решение уравнения (13) с краевыми условиями (14) и (15) по-прежнему в виде суммы

$$v(r, t) = v_1(r, t) + v_2(r, t), \quad (16)$$

где  $v_1(r, t)$  — решение задачи, учитывающее действие перепада давления,  $v_2(r, t)$  — то же, учитывающее влияние стенок трубы и начальное распределение скоростей.

Функция,  $v_2(r, t)$  является решением неоднородного уравнения

$$\frac{\partial v_2}{\partial t} = v \left( \frac{\partial^2 v_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) + f(t) \quad (17)$$

при нулевых начальных и граничных условиях

$$v_2(R, t) = 0, \quad \frac{\partial v_2(r_0, t)}{\partial r} = 0 \quad \text{при } t \geq 0, \quad (18)$$

$$v_2(r, 0) = 0 \quad \text{при } r_0 \leq r < R \text{ и } t = 0, \quad (19)$$

а  $v_2(r, t)$  — решением однородного уравнения

$$\frac{\partial v_2}{\partial t} = \left( \frac{\partial^2 v_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) \quad (20)$$

при краевых условиях

$$v_2(R, t) = 0, \quad \frac{\partial v_2(r_0, t)}{\partial r} = 0 \quad \text{при } t > 0, \quad (21)$$

$$v_2(r, 0) = \Theta(r) \quad \text{при } r_0 \leq r < R \text{ и } t = 0. \quad (22)$$

Общее решение уравнения (20) с краевыми условиями (21) и (22) имеет вид [5, 6]

$$v_2(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\lambda_k^2 t} V_0(\lambda_k r), \quad (23)$$

где  $\lambda_k$  — собственные числа задачи, являющиеся корнями характеристического уравнения

$$J_0(\lambda_k R) Y_1(\lambda_k r_0) - J_1(\lambda_k r_0) Y_0(\lambda_k R) = 0; \quad (24)$$

$J_0(\lambda_k r)$ ,  $J_1(\lambda_k r)$  — соответственно Бесселевы функции первого и нулевого и первого порядка;  $Y_0(\lambda_k r)$ ,  $Y_1(\lambda_k r)$  — то же, второго рода нулевого и первого порядка;  $V_0(\lambda_k r)$  — комбинация Бесселевых функций  $V_0(\lambda_k r) = J_0(\lambda_k r) Y_0(\lambda_k R) - J_0(\lambda_k R) Y_0(\lambda_k r)$ .  $A_k$  — некоторые постоянные коэффициенты, определяемые из начального условия

$$A_k = \frac{-\lambda_k^2}{2} \int_{r_0}^R r \Theta(r) V_0(\lambda_k r) dr. \quad (25)$$

Частное решение неоднородного уравнения (17) найдем в виде ряда Фурье-Бесселя по собственным функциям однородного уравнения

$$v_1(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} B_k(t) V_1(\lambda_k r) e^{-\lambda_k^2 t}. \quad (26)$$

Подставляя значение  $v_1(r, t)$  из (26) в (17), для определения коэффициентов  $B_k(t)$  получаем уравнение

$$\sum_{k=1}^{\infty} B_k(t) V_1(\lambda_k r) e^{-\lambda_k^2 t} = f(t). \quad (27)$$

Обе части равенства умножим на  $r v_1(\lambda_m r)$  и, проинтегрируя от  $r_0$  до  $R$ , получим

$$\frac{2B_k(t) e^{-\lambda_k^2 t}}{-\lambda_k^2} = \frac{2f(t)}{-\lambda_k^2},$$

откуда

$$B_k(t) = \pi \int_0^1 f(t) e^{-\lambda_k^2 t} dt. \quad (28)$$

Общее решение задачи с учетом (8) и (16) будет

$$U(r, t) = \frac{r_0}{r} \left( r - r_0 - r_0 \ln \frac{r}{R} \right) + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k + B_k) V_k(r) e^{-\lambda_k^2 t}. \quad (29)$$

Таким образом, получена формула распределения скоростей по поперечному сечению трубы при нестационарном ламинарном течении вязко-пластичной жидкости для общего случая. Общее решение позволяет получить формулы для частных случаев, подставляя при этом соответствующие начальные и граничные условия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов Е. Г., Исаев В. И. Гидроэрономеханика и бурение — М., Недра, 1987. — 304 с.
2. Краснеников Ю. И. Нестационарное движение вязкопластичной жидкости в круглой трубе // И.М.М. — 1984. — Т. 20, № 5 — С. 655—660.
3. Галин Н. В. Нестационарное течение вязкопластичной среды в круглой трубе // ДАН СССР — 1954. — Т. 95, № 3. — С. 173—175.
4. Краснеников Ю. И. Нестационарное движение вязкопластичной жидкости в цилиндрической трубе круглого поперечного сечения // ДАН СССР — 1954. — Т. 95, № 5. — С. 947—950.
5. Давид А. В. Теория теплопроводности. — М.: Наука, 1967. — 509 с.
6. Саргсисян А. А. Нестационарное ламинарное течение вязкой жидкости в кольцевом гидравлическом трубопроводе // ДАН АрмССР. Сер. ТН. 1990. — Т. 43, № 4. — С. 185—188.

СрПН

20. III, 1990

Изв. АН Армении (сер. ТН), — XLV, № 5—6, 1991, с. 263—268

## ГИДРАВЛИКА

УДК 621.226

В. В. ОЛАНЕСЯН

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЗАЩЕМЛЕНИЯ И ОБЛИТЕРАЦИИ В ЗОЛОТНИКАХ УПРАВЛЕНИЯ ПЛУНЖЕРНОГО ТИПА

Описаны причины заклинивания золотников дистанционного управления плунжерного типа. Приведены краткое описание экспериментального исследования этого явления и выбор на основании их результатов оптимальных параметров плунжерной пары для работоспособной конструкции золотника.

Ил. 4. Библиогр.: 2 назв.

Գրադրվում են ստացված տվյալ բաշխիչների լոգիկա պրոցեսները, ներառված են էլեկտրի փոխարարական շեղանկալի խոսքի և հիդրավրիկ և զրա արդյունքներ հիման վրա օպտիմալական կառուցվածքի պարամետրերի բնորոշումը:

Благодаря малой инерционности гидропривода гидросистемы отличаются высокой приемистостью и минимальным временем запаздывания.

дывания при обработке командных сигналов, что важно для быстродействующих следящих приводов. С увеличением рабочего давления в гидросистемах эти преимущества становятся ещё более ощутимыми, но при этом приходится сталкиваться с нежелательными явлениями. К их числу относится и малонзученное явление заклинивания, которое имеет место практически во всех золотниках дистанционного управления плунжерного типа (так называемых «пилотах»). После выдержки системы под давлением определенное время электромагнит обесточивается, по сброса давления и разгрузки системы не происходит из-за заклинивания золотника.

Рассмотрим причины, приводящие к заклиниванию золотника.

1. *Гидравлическое защемление.* В результате неравномерного распределения давления жидкости в кольцевой щели золотниково-пары возникают неуравновешенные радиальные силы, прижимающие золотник к стенке цилиндра. Сила трения в паре при этом превосходит усилие, возвращающее золотник в исходное положение. Давление жидкости [1] на единицу ширины поверхности  $dz$  (рис. 1) определяется согласно уравнению

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{12\mu dq}{s^3 dz},$$

где  $\mu$  — абсолютная вязкость,  $dq$  — расход жидкости.

Опустив математические выкладки, определяем, что в общем случае размещения конусного золотника в цилиндрической втулке давление меняется по параболическому закону

$$p = p_1 - \frac{\Delta p (s_1 + h)^2}{h (2s_1 + h)} \left( 1 - \frac{s_1^2}{y^2} \right), \quad \Delta p = p_1 - p_2,$$

Величина радиальной силы, действующей на элементарную площадку поверхности золотника, равна  $p \, dx \, dz$ . Производя двойное интегрирование по длине щели и окружности, получаем выражение для полной радиальной силы. В рассматриваемом случае важна её составляющая  $dF$ , действующая в плоскости эксцентриситета (в симметрии все остальные её компоненты уравновешены):

$$dF = -L \frac{D_0}{2} \left( p_1 - \Delta p \frac{s + h + e \cos \theta}{2s + h + 2e \cos \theta} \right) \cos^2 \theta d\theta,$$

где  $s = (D_1 - D_0)/2$ .

Интегрируя по  $\theta$  от 0 до  $2\pi$ , получаем неуравновешенную радиальную силу

$$F = -\frac{e L D_0 h \Delta p}{4e} \left( 1 - \frac{2s + h}{1 + (2s + h)^2 - 4e^2} \right).$$

В случае расширяющегося в направлении потока жидкости щели (рис. 1 а) эта сила действует со стороны широкого зазора (2), раздвигая золотник относительно собственной оси и прижимая её

к противоположной стороне (1). В случае сужающейся в направлении потока щели (рис. 1 б) максимальный градиент давления возникает в месте максимального сужения щели и радиальная неуравновешенная сила смещает золотник, выравнивая его в положение, соосное оси цилиндра.

2. Грязевое заземление, облитерация. Анализ существующих работ [1, 2] и наши наблюдения позволяют предположить, что зарастание щели происходит вследствие наложения процессов облитерации—адсорбции полярно-активных молекул жидкости и грязевого засорения твердыми частицами жидкости. Это в свою очередь приводит к изменению геометрии щели, что способствует возникновению и росту неуравновешенных гидродинамических сил. С целью проверки этих предположений и выдачи рекомендаций для проектирования работоспособной конструкции «пилота» было проведено экспериментальное исследование. Эксперименты проводились на «пилотах» серийных

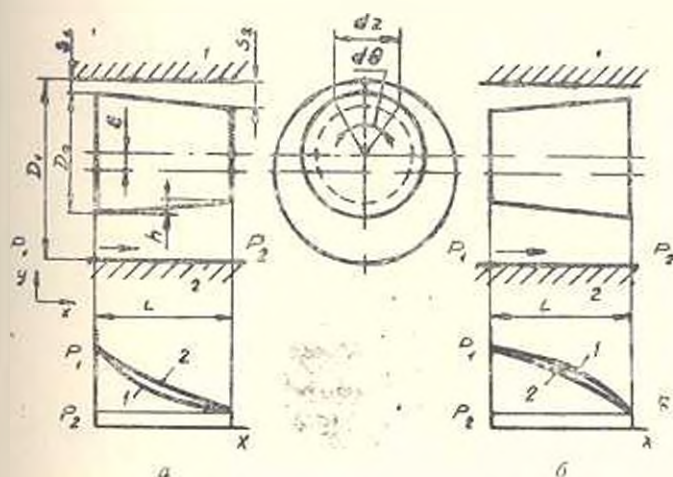


Рис. 1. Расчетные схемы и эпюры давления в золотниковой паре для случаев: а) расширяющегося зазора; б) сужающегося зазора. 1, 2 — кривые давления со стороны наиболее узкого и широкого зазора.

разруочно-предохранительных клапанов марки Г52-2. Рабочая жидкость—масло «Индустриальное-20» с чистотой фильтрации, применяемой на практике. На золотнике управления был установлен электромагнит марки МТ6802 с ходом якоря 5 мм и максимальной силой 50 Н. Сила возвратной пружины—40 Н, время выдержки по ТУ—30 мин. Для исследуемой конструкции «пилота» величина радиальной защемляющей силы была равна 630 Н при  $h = 0,005$  мм,  $L = 14$  мм,  $D_0 = 10$  мм,  $e = 0,005$  мм,  $\Delta p = 20$  МПа. Для уменьшения этой силы была принята новая конструкция золотника со сходящейся в направлении потока жидкости щелью и проточкой, образующей два самостоятельных пояска. Защемляющая сила при этом уменьшалась до  $F = 13$  Н из-за существенно уменьшения длины щели. Утечки соответственно резко возросли, однако действие защемляющей силы

практически снилось к нулю. Заклинивание при этом могло произойти только вследствие зарастания щели, что подтверждалось существенным уменьшением утечек и течение щели выдержки под давлением. Система при этом разгружалась посредством вспомогательного распределителя и линии потом обесточивалась. Электромагнит, от которого золотник не срабатывал, т. е. происходило заклинивание.

Причина заклинивания — облитерация, приводящая к уменьшению сечения щели, что в свою очередь способствует росту застывающей силы. Для подтверждения этого был увеличен зазор и поставлен фильтр более тонкой очистки.

Исследовались также влияние величины зазора, длины перекрытия и давления на интенсивность процесса облитерации и соответственно по времени выдержки системы под нагрузкой до заклинивания «золота» (рис. 2).

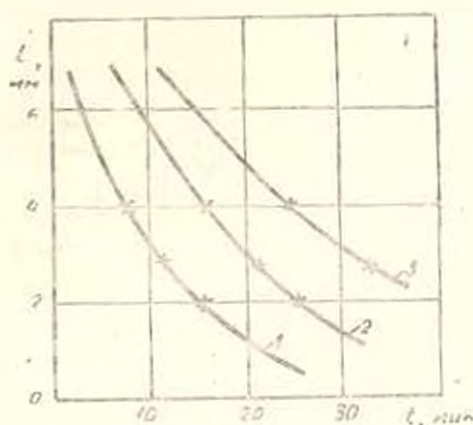


Рис. 2. Зависимость времени заклинивания от величины перекрытия. Кривые 1, 2 и 3 — при  $\Delta p = 20 \text{ МПа}$  и зазорах 6, 10 и 15 мкм.

При исследовании зависимости процесса облитерации от перепада давлений (рис. 3 а) сначала строился график изменения расхода через щель, а затем определялась тот момент, фиксирующий момент заклинивания. Из графика видно, что существует прямая зависимость интенсивности процесса облитерации от перепада давлений, а следовательно — от расхода жидкости через щель. Это подтверждает предположение, что чем больше расход, тем больше за единицу времени через щель пройдет полиарно-активных молекул, адсорбирующихся на твердых поверхностях пары, и соответственно выше интенсивность облитерации.

На основании экспериментальных данных (рис. 3, 4), задаваясь одним из параметров (например, временем выдержки под давлением), можно определить величины зазора и перекрытия. Задаваясь допустимой величиной утечек ( $80 \text{ см}^3/\text{мин}$ ) и минимальным временем выдержки (30 мин) золотника под давлением (рис. 3 б), определяем приемлемую величину перекрытия — 3 мм. Из графика зависимости

величины зазора от времени защемления (рис. 4) при заданном давлении (линия 2, соответствующая перекрытию  $L = 3$  мм) определяем оптимальную для этих данных величину зазора 13 мм.

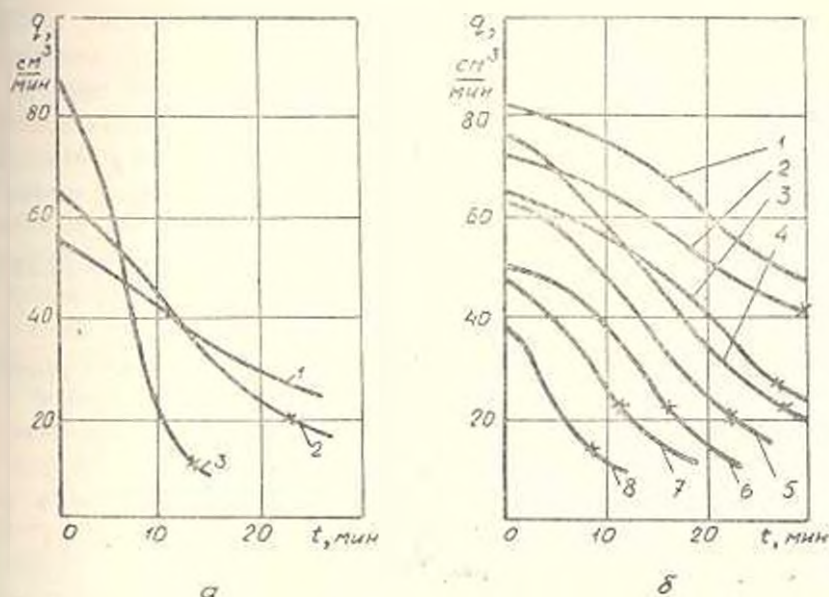


Рис. 3. Зависимость расхода от времени выдержки и момент заклинивания: а) кривые 1, 2 и 3 при  $p = 10, 20$  и  $25$  МПа; б) кривые 1, 2 и 3 для зазора 15 мм и давлению перекрытия 1, 2, 3 и 4 мм; 4, 5 и 6 — для зазора 10 мм и 1, 2, 3 и 4 мм; 7 и 8 — для зазора 6 мм и 1 — 3 и 4 мм.

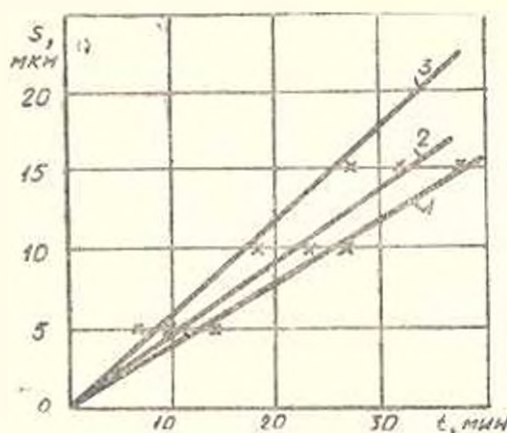


Рис. 4. Зависимость времени заклинивания от величины зазора. Линии 1, 2 и 3 соответствуют  $\Delta p = 20$  МПа и  $L = 2, 3$  и 4 мм.

Партия золотников дистанционного управления с рекомендованными на основании проведенного исследования параметрами удовлетворительно прошла испытания и предложенная конструкция была рекомендована к серийному производству.

1. Башта Г. М. Гидравлические приводы летательных аппаратов — М. Машиностроение, 1967 — 387 с.
2. Гамынин Н. С. Основы следящего гидравлического привода — М. Оборонгиз, 1962, — 249 с.

ЕрПИ

26. IV. 1990

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XI, IV, № 5—6, 1991, с. 212—217.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.375.85

О. А. АМБАРЦУМЯН, П. Г. АРУСТАМЯН, М. С. ОСИПЯН, Г. А. ЧАЛИКЯН

## ДВУХКАНАЛЬНЫЙ МОНОЛИТНЫЙ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЙ КОНВОЛЬВЕР

Рассмотрены результаты разработки и исследования двухканального монолитного акустоэлектронного конвольвера на поверхностных акустических волнах. Исследования доведены до реализации прибора со следующими параметрами: центральная частота — 150 МГц; полоса рабочих частот при неравномерности выходного сигнала — 1,5 дБ—20 МГц; время интегрирования — 15 мкс; эффективность — 72 дБ, динамический диапазон — 40 дБ. Изделие может найти широкое применение в качестве согласующего фильтра в системах связи с шумоподобными сигналами.

Пл. 3. Библиогр.: 5 назв.

Քանի որ լինում է, որ հիմնականում մասնագիտացված գիտնականները հետազոտում են ինտեգրացիոն և ֆիլտրացիոն սխեմաները, իսկ ինտեգրացիոն և ֆիլտրացիոն սխեմաները, որն ունի ինտեգրացիոն և ֆիլտրացիոն հատկություններ, 20 ՄՀց աշխատանքային հաճախականությունների շերտ (կարողանալիք 1,5 դԲ անհավասարակշռության դիսկրետ), 75 մկվ ինտեգրացիոն ժամանակ, 72 դԲ արդյունավետություն և 40 դԲ դինամիկական տիրույթը։ Սարքը կարող է լինել կիրառական գիտության համակարգերում ֆիլտրի՝ աղմուկի և աղմուկային աղմուկների կապի համակարգերում։

В последнее время наблюдается интенсивное развитие направления техники, связанного с использованием поверхностных акустических волн (ПАВ) для обработки радиосигналов. Интерес к этому направлению еще более возрос после открытия эффектов нелинейного взаимодействия и волноводного распространения ПАВ. Попытки путей практического использования этих эффектов привели к созданию акустоэлектронного конвольвера-устройства, осуществляющего корреляционную обработку (свёртку) ограниченных по длительности сигналов в реальном масштабе времени [1].

Использование в радиотехнических системах связи шумоподобных сигналов (ШПС) привело к разработке множества разновидностей акустоэлектронных конвольверов, используемых в качестве согласованных фильтров для быстрого поиска и вхождения в синхронизм.

Одним из разновидностей подобных устройств является монолитный конвольвер, в котором используется пьезоэлектрическая нелинейность звукопровода. Имеются сообщения о разработке и серийном выпуске монолитных конвольверов фирмами «SIEMENS» [2], «Raytheon» [3] и др.

В настоящей работе предлагается двухканальный монолитный акустоэлектронный конвольвер на ПАВ, предназначенный для использования в системах связи с ШПС. Одним из важных параметров устройств подобного типа является динамический диапазон обрабатываемых сигналов, который во многих практических случаях определяется не шумами, а ложными сигналами. В частности, к ложным сигналам относится сигнал самосвертки, образующийся при отражении ПАВ от противоположного встречно-штыревого преобразователя (ВШП). Исследования показывают, что одним из эффективных методов подавления уровня сигнала самосвертки является применение двунаправленной конструкции конвольвера. Такая конструкция состоит из двух пар электрически ортогональных ВШП (рис. 1), расположенных между ними двух параметрических выходных электродов и четырех сужателей акустического пучка. Принцип подавления сигнала самосвертки в такой конструкции заключается в следующем: ПАВ, излученные ВШП первой пары, находятся в фазе, в то время как ПАВ, излученные ВШП второй пары, имеют фазы, отличающиеся на  $180^\circ$ . Сигналы свёрток двух каналов находятся в противофазе, в то время как сигналы самосвёрток оказываются в одинаковой фазе. Использование в качестве сумматора выходных сигналов каналов трансформатора с симметричным входом и несимметричным выходом добиться суммирования сигналов свёрток и взаимной компенсации сигналов самосвёрток. Такой же эффект можно получать использованием емкостной связи между двумя выходными электродами, при этом один из электродов заземляется, а выходной сигнал снимается с другого. Вторая конструкция более удобна и практически реализована в нашем случае.

В конвольверах на ПАВ эффективность или так называемый коэффициент качества зависит от ширины акустического пучка в соответствии с выражением [1]

$$F \sim 10 \lg \frac{M^2}{L^2 R},$$

где  $L$ —ширина акустического пучка;  $M$ —обобщенный параметр, учитывающий нелинейные свойства пьезоматериала и конструкцию устройства;  $R$ —сопротивление нагрузки.

Следовательно, для повышения эффективности необходимо применить максимально возможное сужение акустического пучка. Существуют несколько типов акустических сужателей и выбрана конструкция многополоскового концентратора, сжимающего акустический пучок в 15 раз. Такой концентратор имеет сравнительно малые потери, но требует высокую технологическую точность изготовления.

Минимальная ширина акустического металлизированного волновода, при которой еще приемлемы дисперсионные искажения, равна 33,7  $\lambda$  (длина волны пьезоэлектрике) [1]. При этом апертура ВШП равна 15  $\lambda$ .

В качестве пьезоэлектрика использован ниобат лития.

В ходе работы было уделено особое внимание вопросам широкого полосного согласования входных и выходных импедансов конвольвера. Исследования показывают, что на частотах 100 МГц и выше на импеданс ВШП на ниобате лития, имеющего относительно высокую диэлектрическую проницаемость, сильно влияют паразитные емкости и индуктивности контактных площадок и соединительных проводников. Анализ эквивалентной схемы ВШП с учетом паразитных реактивных элементов позволил привести её к известной схеме широкополосного согласования импедансов [4].

Одной из причин, приводящих к искажениям выходного сигнала в конвольвере с временем интегрирования более 10 нс, является эффект «длинной линии», который появляется из-за того, что сигнал снимается неодновременно со всей поверхности выходного параметрического электрода. Кроме того, сопротивление проводящей накладки параметрического электрода приводит к потерям. Для исключения этих недостатков на параметрическом выходном электроде предусмотрены 8 выводов, эквидистантно распределенных по всей его длине, которые короткими проводниками соединяются с выходной согласующей платой, представляющей собой микрополосковую собирающую линию и схему широкополосного согласования.

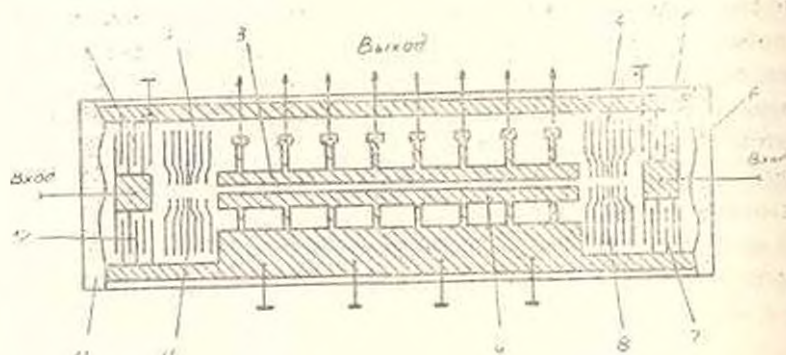


Рис. 1. Топологическая структура двухканального монолитного акустоэлектронного конвольвера: 1, 5, 7, 11 — встречно-штыревой преобразователь; 2, 4, 8, 10 — сужатель акустического пучка; 3, 9 — параметрический выходной электрод; 6, 11 — акустопоглотитель.

Экспериментально полученные значения основных электрических параметров двухканального монолитного акустоэлектронного конвольвера следующие: центральная частота — 150 МГц; полоса рабочих частот при неравномерности выходного сигнала свертки не более 1,5 дБ — 20 МГц; время интегрирования — 15 нс; эффективность (ка-

чество) — 72 дБм; динамический диапазон — 40 дБ, уровень ложного сигнала самосвёртки — 41 дБ.

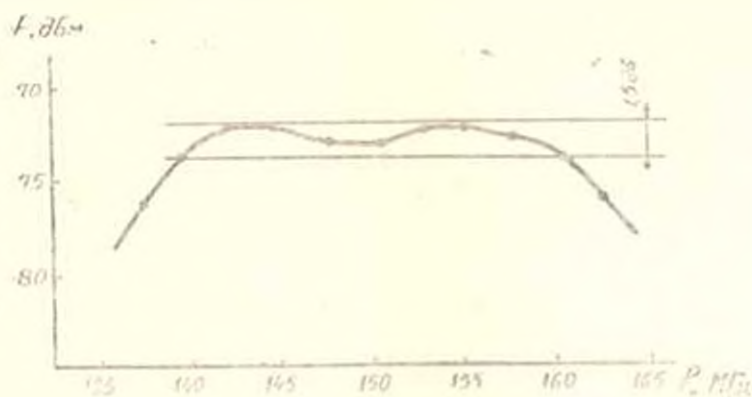


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента качества.

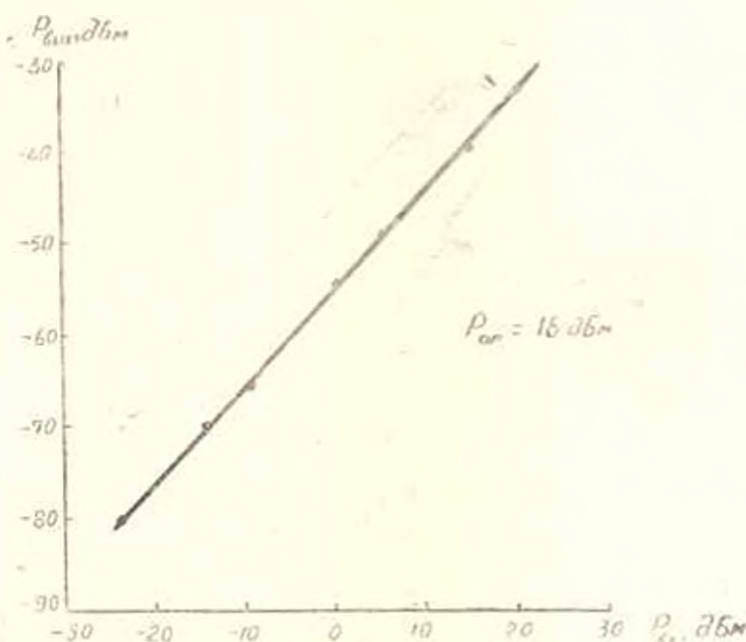


Рис. 3. Зависимость выходной мощности конвольвера от входной мощности.

По некоторым параметрам (эффективность, время интегрирования, динамический диапазон) конвольвер сравним с известными аналогами [2, 3, 5], однако по полосе пропускания и неравномерности в полосе пропускания (рис. 2), несколько уступаем им. Причиной возникновения неравномерности в полосе пропускания и относительно низкого уровня подавления ложного сигнала является неполная симметрия между двумя каналами, обусловленная трудностями изготовления идентичных многополосковых концентраторов и волноводов в обоих

каналах. Все это приводит к возникновению фазовых искажений и дисперсии в волноводах. Уменьшение полосы пропускания конвольвера связано с недостаточно полным учетом всех паразитных емкостей и индуктивностей.

На рис. 3. приведена зависимость выходной мощности опорного  $P_{вых}$  от входной  $P_{вх}$  при фиксированном значении мощности опорного сигнала  $P_{оп} = 16$  дБм.

Результаты проведенных работ показывают перспективность разработки и изготовления подобных устройств для обработки радиосигналов в системах связи с ШПС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нелинейные акустоэлектронные устройства и их применение/Под ред. В. С. Бондаренко.—М.: Радио и связь, 1985.—160 с.
2. Grasse H. P. SAW Convolver for Matched Filtering Microwave Signals.—1985 July.—V. 28, № 7.—P. 169—177.
3. Brown J. Kaytheon readies production SAWs Microwave and R F.—1985 July.—V. 24, 7.—P. 139—144.
4. Adler E. L. Broadband Matching for Multiply Tapped SAW Convolver//Proc. of 1981 IEEE Ultrason. Symp.—New York IEEE, 1981.—P. 232—205.
5. Дефрануэль Ф., Марфеллод Ш. Планарный пьезоэлектрический конвольвер на ПАВ/ТНИИЭР—1976.—Т. 64, № 5.—С. 218—221.

Г. фил. Моск. НИИ радиосвязи

24 VII 1989

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 5—6, 1991, с. 272—277.

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 531.751.3.082.22.088.4

С. Г. КЮРЕГЯН

## КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРАХ

Рассмотрены косвенные методы измерения массы жидкости в резервуарах произвольной формы и получены соотношения, которые можно принять за основу при метрологическом анализе и построении информационно-вычислительных систем учета массы.

Библиогр.: 4 назв.

Գրություններ են հերոսի գանդգար անուղղակի չափումների մեթոդները ցանկացած ձևի պահեստայիններում և ստացված են հարաբերակցություններ, որոնք կարելի է բնականորեն արդեն հիմք գանդգարի հաշվարկան չափարանական գերազանցության և տեղեկատվական հաշվարկան համակարգերի կառուցման համարել:

В настоящее время у нас и за рубежом разрабатываются информационно-вычислительные системы распределения и учета жидких продуктов, хранящихся в резервуарах, позволяющие организовать про-

целуру косвенного измерения массы жидкости при учетно-коммерческих операциях. В существующей практике косвенных измерений массы жидкости (1) не учитывается влияние ряда факторов (форма резервуара, уровень начального заполнения и др.) на погрешность измерения, что снижает точность учета и приводит к потерям ресурсов.

Целью настоящей работы является попытка обобщить косвенные методы измерения массы жидкости, проанализировать и обобщить составляющие возникающих погрешностей и определить диапазон измерения массы жидкости в резервуарах произвольной формы, необходимых для алгоритмического обеспечения информационно-вычислительной системы.

В основу косвенных методов измерения массы положено теоретическое определение массы  $M$  вещества в объеме  $V$ :  $M = \int_V \rho dV$ ,

где  $\rho$ —плотность вещества в точке объема, зависящая от координат трехмерного пространства.

Будем полагать, что жидкость в резервуаре находится в состоянии абсолютного покоя, а плотность изменяется в вертикальном направлении. Реальное распределение значения плотности жидкости в резервуаре практически получить невозможно. Принимая в качестве исходного состояния резервуар, наполненный жидкостью с плотностью на дне и на поверхности соответственно  $\rho_0$  и  $\rho_1$ , будем аппроксимировать значение плотности вдоль вертикальной оси резервуара в виде степенного ряда, учитывая, что при сливе на дне оказываются верхние слои жидкости:

$$\rho(z, h) = \rho_0 \left[ 1 - \delta_0 \frac{\sum_{i=1}^n a_i z_h^i}{\sum_{i=1}^n a_i} - \delta_1 \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n a_i z_h^i}{\sum_{i=1}^n a_i} \right) \frac{\sum_{i=1}^n a_i (z/h)^i}{\sum_{i=1}^n a_i} \right], \quad (1)$$

$$0 \leq z \leq h, \quad 0 \leq h \leq 1,$$

где  $z$  и  $h$ —относительные значения вертикальной координаты и уровня жидкости,  $h = H/H_m$ ;  $\delta_0 = (\rho_0 - \rho_1)/\rho_0$ —максимальное относительное отклонение плотности жидкости;  $z_h = f^{-1}[1 - f(h)]$ —относительный уровень верхнего слоя жидкости в полном резервуаре, оказавшийся на дне после слива;  $H$ ,  $H_m$ —текущее и максимальное значение уровня жидкости;  $v = f(h)$ —объем жидкости в резервуаре на уровне  $h$ , отнесенный к полному объему (градуировочная характеристика резервуара в относительных единицах);  $f^{-1}$ —функция, обратная  $f(h)$  ( $h = f^{-1}(v)$ ), для резервуаров, симметричных относительно центральной плоскости поперечного сечения (сферических, цилиндрических и др.);  $z_h = 1 - h$ .

Принимая во внимание, что

$$V = H_m \int_0^h S(z) dz, \quad P = H_m \int_0^h g \rho(z, h) dz, \quad (2)$$

где  $V$ ,  $S$ ,  $P$ —соответственно объем, площадь поперечного сечения и давление жидкости на уровне  $h$ ,  $g$ —ускорение свободного падения, получаем две разновидности теоретического определения значения массы жидкости

$$M = \int_0^{V(h)} \rho(z, h) dV = \frac{1}{g} \int_0^{P(h)} S(z) dP = H_m \int_0^h \rho(z, h) S(z) dz. \quad (3)$$

На практике с помощью средств измерения определяют состояние измеряемого объекта и, используя градуировочную характеристику резервуара, определяют массу жидкости (1):

$$M = \rho_{cp} V = (\rho_{cp} S_{cp}) h, \quad (4)$$

где  $\rho_{cp}$ ,  $S_{cp}$ —средние значения плотности жидкости и площади поперечного сечения резервуара на уровне  $h$ .

Сравним (4) с (3), заметим, что на практике массу жидкости определяют по средним значениям плотности жидкости или сечения резервуара

$$\rho_{cp}(h) = \frac{1}{V} \int_0^V \rho(z, h) dV, \quad S_{cp}(h) = \frac{1}{h} \int_0^h S(z) dz = V/H, \quad (5)$$

из-за чего и полученная масса может содержать методическую погрешность  $\Delta M_{мет} = M_1 - M$ . Определим ее, принимая в качестве расчетного выражения третий интеграл в (3) и учитывая (2) и (5):

$$\Delta M_{мет} = H_m \int_0^h \rho(z, h) [S(z) - S_{cp}(h)] dz = H_m \int_0^h S(z) [\rho(z, h) - \rho_{cp}(h)] dz. \quad (6)$$

При проведении товарных операций массу жидкости в резервуаре измеряют дважды—до и после операции, а массу отпускаемой или принимаемой жидкости определяют как абсолютную разность масс двух измерений. Поэтому методическая погрешность измерения массы жидкости в этом случае будет зависеть как от количества товарной массы, так и от начального уровня жидкости в резервуаре. Например, измерение массы жидкости с относительным значением  $m = M/M_{\text{полн}} = 0,2$ , где  $M_{\text{полн}}$ —масса жидкости полного резервуара, для тех же резервуаров и при тех же условиях совершается с максимальной методической погрешностью соответственно 0,26 и 0,16%, которая достигается при полном резервуаре. Для значения массы  $m = 0,5$  эти погрешности равны 0,08 и 0,05% соответственно на уровне  $h = 0,65$  при

оттуске и  $h = 0,15$  при приеме жидкости. Анализ указывает на необходимость учета методической составляющей погрешности косвенных измерений массы жидкости.

Рассмотрим инструментальную погрешность косвенных измерений в резервуарах произвольной формы. Предварительно обобщим формулы косвенных методов (4), представив их одним матричным выражением

$$M \equiv y^T G v, \quad (7)$$

где  $y^T = [P, H, \rho]$ ,  $v^T = [S, V]$  — векторы, компоненты которых представляют измеримые параметры жидкости и параметры градуировки резервуара соответственно,  $G = \|g_{ij}\|$  — матрица результатов метода измерений.

Вектор состояния объекта измерения можно выразить через вектор  $y$ :  $x = Cy$ , где  $C = \|c_{ij}\|$  — матрица преобразования. В матрицах  $G$  и  $C$  элементы  $g_{11} = 1/g$ ,  $c_{11} = c_{21} = 1$  или  $c_{11} = 1$ ,  $c_{12} = c_{22} = 1$  при реализации соответственно гидростатического и объемно-массового методов, а остальные элементы нулевые.

Определим погрешность косвенных измерений при известных погрешностях средств измерения и градуировки резервуара

$$\Delta M = \Delta y^T G v + y^T G \Delta v + y^T G (\partial y / \partial H) \Delta H, \quad (8)$$

где  $\Delta y$ ,  $\Delta v$  — векторы абсолютной погрешности соответственно средств измерения и градуировки резервуара,  $\Delta H$  — абсолютная погрешность измерения уровня жидкости.

Оценим относительно погрешность  $\delta M$  измерения массы жидкости, используя среднеквадратические отклонения относительных погрешностей средств измерения и градуировки резервуара с учетом их статистической независимости при контрольных и товарных операциях соответственно [2]:

$$\delta M = k_p (\delta x^2 + \delta v^2 + \delta A^2)^{1/2}, \quad (9)$$

$$\delta M = k_p \left( \frac{m_0 (\delta x_0^2 + \delta v_0^2) + m_1 (\delta x_1^2 + \delta v_1^2)}{m^2} + \delta A^2 \right)^{1/2},$$

где  $\delta x^2 = \| \delta x \|^2 = \delta x^T Q \delta x$ ,  $\delta v^2 = \| \delta v \|^2$ ,  $\| \cdot \|^2$  — норма вектора;  $Q = \| q_{ij} \|$  — матрица чисел  $q_{ij}$  коэффициентов:  $q_{ij} = y^T G \frac{\partial y}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial M}$ ;  $q_{ij} = (y^T G V y) M^{-1}$ ,  $\delta x = C \delta y$ ,  $\delta y^T = [\delta P, \delta H, \delta \rho]$ ,  $\delta v = \delta V, \delta H, \delta R, \delta \rho, \delta V, \delta N = c, k, a$  — относительные погрешности соответственно измерения уровня, давления, средней плотности жидкости градуировки резервуара и вычислительной системы;  $m$  — относительная масса жидкости;  $k_p$  — эмпирический коэффициент; «0», «1» — индексы, обозначающие параметры до и после товарной операции.

Для объемно-массового и гидростатического методов измерения получим соответственно

$$\delta x^1 = (S/S_{cp})^2 \delta V^1 + \delta \varphi_{cp}^1, \quad \delta x^2 = (S/S_{cp} - 1)^2 \delta V^2 + \delta V^2. \quad (10)$$

Для резервуаров с постоянной площадью поперечного сечения (например, вертикальные цилиндрические резервуары)  $S = S_{cp}$  и выражения погрешностей (9) с учетом (10) совпадают с моделями [1]. Это обстоятельство позволяет сделать важный вывод о том, что ГОСТ [1] регламентирует модели погрешностей косвенных измерений массы жидкости только в частном случае, когда  $S = \text{const}$ .

ГОСТ [1] регламентирует модели погрешностей косвенных измерений зависит от способа нормирования погрешностей средств измерения [3, 4]. Обычно нормируются относительные погрешности градуирования резервуара и измерения плотности жидкости

$$\delta V_c = \delta V_s = \delta V, \quad \delta \varphi_{cp, c} = \delta \varphi_{cp, s} = \delta \varphi_{cp},$$

Для средств измерения давления и уровня жидкости в общем случае рассмотрим нормирование двухчленного выражения погрешности

$$\delta H = (c_n - d_n) + d_n/h, \quad \delta P = (c_p - d_p) + d_p/h^2(h),$$

где  $c$  и  $d$  — нормируемые параметры, определяющие класс точности средства измерения,  $\psi(h) = p_{cp}(h)/p_{cp, n}$ ,  $p_{cp, n}$  — среднее значение плотности жидкости полного резервуара. В частности, при нормировании относительной погрешности средств измерения  $d = 0$ , а в случае нормирования приведенной погрешности —  $c = d$ .

Из первого выражения (9) следует, что для резервуара заданного класса точности допустимые погрешности измерения массы  $\delta M_x$  и средств измерения  $\delta x_x$  взаимосвязаны:  $\delta x_x = ((\delta M_x/\delta x_x)^2 - \delta V^2 - \delta M^2)^{1/2}$ . Обозначая через  $\varepsilon_x(h) = \delta x/\delta x_x$ , запишем условие определения минимального уровня жидкости в резервуаре, массу которой измеряем с погрешностью  $\delta M_x$

$$\varepsilon_x(h) = 1. \quad (11)$$

Для объемно-массового и гидростатического методов получим соответственно

$$\varepsilon_x(h) = (\varphi^2(h) \varepsilon_p^2(h) + \varepsilon_v^2)^{1/2}, \quad \varepsilon_x(h) = ((\varphi(h)^2 - 1)^2 \varepsilon_v^2(h) + \varepsilon_p^2(h))^{1/2}, \quad (12)$$

где  $\varphi(h) = S(h)/S_{cp}(h)$ ,  $\varepsilon_v(h) = \varepsilon_{v, n} - \varepsilon_{d, n}/h$ ,  $\varepsilon_p(h) = \varepsilon_{p, n} - \varepsilon_{d, p} - \varepsilon_{d, p}/h\psi(h)$ ,  $\varepsilon_v = \delta x_v$ ,  $\varepsilon_d = d/\delta x_x$ ,  $\varepsilon_p = \delta \varphi_{cp}/\delta x_x$ .

Применяя условие (11) к (12), определим минимальный уровень, который можно пересчитать на минимальную массу по формуле  $m = f(h)$ , где  $F(h) = f(h)\psi(h)$ . Из второго выражения (9) найдем условие проведения товарных операций с допустимой погрешностью  $\delta M_x$

$$m^2(1 + \varepsilon_v^2) - m_0^2(\varepsilon_p^2(h_0) + \varepsilon_v^2) - m_x^2(\varepsilon_p^2(h_x) + \varepsilon_v^2) = 0, \quad (13)$$

где  $z_r = \sqrt{V/\rho} \cdot \Delta z_r$ . Решая (13) относительно  $m$  с учетом  $m_0 = F(h_0)$ ,  $m_k = m_0 \mp m$  и  $h_k = F^{-1}(m_k)$ , получаем зависимость минимальной массы, измеренной с погрешностью  $\Delta M_k$ , от начального уровня жидкости в резервуаре произвольной формы при товарных операциях

$$m_{\min} = \Gamma(h_0). \quad (14)$$

Программная реализация полученных математических моделей позволит провести всесторонний анализ метрологических характеристик косвенных измерений в резервуарах произвольной формы и построить информационно-вычислительную систему количественно учета жидкости в резервуарах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 26976-86. Нефть и нефтепродукты. Методы измерения массы.—М.: Изд.-во Энергоатомиздат, 1985.—248 с.
2. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешности результатов измерений.—Л.: Энергоатомиздат, 1985.—248 с.
3. Кюрегян С. Г., Тер-Хачатуров А. А. Метрологические модели в автоматизированных системах распределения жидких продуктов/Сб.: Автоматизированные системы планирования и управления.—Ереван: Айтастан, 1990.—с. 61—68.
4. Кюрегян С. Г. Пределы измерения массы жидкости в вертикальных резервуарах гидростатическим методом. Измерительная техника.—1990.—№ 10.—С. 18—20.

ЕрПИ

Ю. III 1991

Изв. АН Армении (сер. ТН). т. XLIV, № 5—6, 1991, с. 277—281.

## ЭНЕРГЕТИКА

УДК 622.691.4.001

С. Г. АКОПЯН, М. С. АКОПЯН

## АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В РАСЧЕТАХ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ТРАНСПОРТА ГАЗА

Предлагается метод коррекции гидравлического состояния при многократном анализе установившихся режимов систем транспорта газа, обеспечивающий высокую эффективность расчетов на ЭВМ и допустимую точность. Метод основан на применении модифицированной формы теоремы Теллсджеда, впервые изшедшей свое практическое применение в расчетах гидравлических цепей газотранспортных систем (ГТС) при анализе чувствительности. Теорема Теллсджеда, получая интерпретацию для гидравлических цепей, может являться основой для построения новой прикладной теории для анализа и синтеза ГТС.

Библиогр.: 4 назв.

Գազափոխադրման համակարգի (ԳՓՀ) զննարկմանը ուժեղացնելի վերաբերյալ առաջարկվում է հիդրավիկական շղթայի հշտման մեթոդ, որի արդյունքում է հաշվարկվում Գազափոխի մեծ արդյունավետություն և բալիստերիկ հշտման Միջոցը հիմնվում է Բեյլսդեյի թեորեմի մոափոխման մեր հիմնական վրտ Երևանում առկա զանազան էր գործնական հիմնարկը ԳՓՀ հիդրավիկական շղթաների պրոբլեմների լուծմանը:

ժամանակի Քեղկերենի թերթերը, ստանալով հիդրաուլիկական շտաբների համար մեկնարկներով, հարող և հիմք հանդիսանալ ենր հիդրոտարան տնտեսության ստեղծման գործում, ԳՓՀ փերտ-ձուրթան և համագործության ժամանակ:

В [1] рассмотрен метод коррекции потоко-распределения установившихся режимов газотранспортных систем (ГТС), основанный на использовании теории чувствительности.

Основываясь на общих положениях теоремы Телледжена [2], в настоящей работе предлагается совершенно другой подход к решению задачи анализа чувствительности в расчетах коррекции гидравлического состояния ГТС. Показано, что при использовании теоремы Телледжена применительно к гидравлическим цепям ГТС и элементарных вычислительных процедур для определения чувствительности по всем параметрам достаточно провести анализ двух схем—исходной физической существующей схемы ГТС и некоторой другой подобной схемы, которая физически не существует, но по топологии тождественна (идентична) с исходной схемой.

Рассмотрим две схемы—исходную физическую схему ГТС и подобную схему. Давления узлов ( $P_i$  и  $P_i'$ ), потоки газа на участках ( $Q_i$  и  $Q_i'$ ), входные и выходные потоки газа в ГТС ( $q_i$  и  $q_i'$ ) обеих схем удовлетворяют законам Кирхгофа. Тогда согласно [2] гидравлические цепи систем транспорта газа произвольной структуры, состоящие из  $s$  узлов и  $n$  ветвей (участков), подчиняются следующему балансовому уравнению квази-мощностей, которое в матричной форме представим в виде

$$(q_i - [A_{ji}] Q_i)' P_i = 0, \quad (1)$$

$$j = \overline{1, s}, \quad i = \overline{1, n}.$$

В (1) параметры подобной схемы обозначены штрихом, а верхний индекс  $i$ —знак транспонирования.

Предположим, имеем решение задачи потоко-распределения установившегося режима ГТС [3] для одного базового состояния системы  $P_i^0, Q_i^0$ , соответствующее заданным значениям параметров  $P_i^0, q_i^0$ , и произошло изменение режима, вызванное изменением параметров управления  $\Delta P_i$  и неуправляемых параметров  $\Delta q_i$  и  $\Delta K_i$ . Новые приращенные значения давления и потоков, которые действуют в схеме ГТС, удовлетворяют законам Кирхгофа, а, следовательно, и уравнению (1). Подставляя приращенные значения давлений и потоков в (1) и пренебрегая членами второго порядка малости, получаем

$$(\Delta q_i - [A_{ji}] \Delta Q_i)' P_i = 0. \quad (2)$$

Уравнения состояния газопроводных участков и участков с компрессорными станциями (КС) в приращениях представим в матричной форме записи [1]:

$$2[\bar{A}_{ji}] [E_s P_j] \Delta P_j = 2[E_n K_i Q_i] \Delta Q_i - [E_n Q_i] \Delta K_i, \quad (3)$$

$$j = \overline{1, s}, \quad i = \overline{1, n}.$$

тогда из (2) и (3) получим

$$(-q_j - [A_{ji}] [E_s K_i Q_i]^{-1} [\bar{A}_{ji}] [E_s P_i] \Delta P_i + \frac{1}{2} [A_{ji}] [E_s K_i Q_i]^{-1} [E_s Q_i] \Delta K_i) P_j = 0. \quad (4)$$

Поскольку в (1) участвуют уравнения материального баланса относительно всех  $s$  узлов ГТС, то матрица

$$[A_{ji}] [E_s K_i Q_i]^{-1} [\bar{A}_{ji}] = [g_{ij}], \quad (5)$$

$j = \overline{1, s}, i = \overline{1, n}$ ,

входящая в (4), в соответствии со строением полной матрицы узловых проводимостей электрических цепей (при отсутствии поперечных элементов) вырожденная [4]. При этом диагональные элементы (собственные проводимости) матрицы (5) определяются

$$g_{jj} = \sum_{k=1}^n |g_{jk}|, \quad j = \overline{1, s}. \quad (6)$$

Матрица (5) будет невырожденной, если в соответствии с постановкой задачи потокараспределения установившихся режимов ГТС [3] узловые точки  $r = m+1, m+2, \dots, s$  принимать за базисные по давлению и балансирующие по потоку газа. Давления  $P_r$  в этих узлах предполагаются заданными. Заданными также являются внешние потоки газа  $q_k$  ( $k = \overline{1, m}$ ), а давления узлов  $P_j$  и внешние потоки газа балансирующих узлов  $q_r$  ( $r = \overline{m+1, s}$ ) выражаются. В соответствии с этим, матрицы и вектора, входящие в (4), разобьем на клетки низших порядков

$$\Delta q_j = [\Delta q_k] [\Delta q_r]^t, \quad \Delta P_j = [\Delta P_k] [\Delta P_r]^t, \quad (7)$$

$$P_j = [P_k] [P_r]^t, \quad [A_{ji}] = [A_{ki}] [A_{ri}]^t, \quad (8)$$

$$[A_{ji}] [E_s K_i Q_i]^{-1} [\bar{A}_{ji}] = \begin{bmatrix} \frac{g_{jk}}{g_{jj}} & \frac{g_{jr}}{g_{jj}} \\ \frac{g_{rj}}{g_{jj}} & \frac{g_{rr}}{g_{jj}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

В левых частях (7)–(9) индексы  $j = \overline{1, s}, i = \overline{1, n}$ , а в правых частях —  $j = k = \overline{1, m}, r = l = \overline{m+1, s}, i = \overline{1, n}$ .

В правой части (9) квадратные блоки, расположенные в диагонали, при наличии КС в ГТС несимметричные, размерности  $m^2$  и  $(s-m)^2$  соответственно, а недиагональные блоки прямоугольные, размерности  $(s-m)m$  и  $m(s-m)$ . При этом элементы прямоугольных матриц входят в сумму (6) диагональных элементов квадратных матриц, поэтому

$$g_{jj} \geq \sum_{k=1}^m |g_{jk}|, \quad j = \overline{1, m}, \quad (10)$$

$$g_{rr} > \sum_{i=\overline{m+1}, s}^n |g_{ri}|, \quad r = \overline{m+1, s}. \quad (11)$$

В (10) знак строгого неравенства относится к узлам, связанным с балансирующими.

Поскольку имеет место соотношение (10) и (11), то из теоремы О. Таусеки [4] следует, что квадратные блоки, расположенные в диагонали матрицы (9), невырожденные. Следовательно, квадратные блоки, расположенные на диагонали матричного произведения

$$\begin{bmatrix} E_m & | & g_{rs} \\ \hline g_{rs} & | & E_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_m P_s & | & 0 \\ \hline 0 & | & E_r P_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{rs} & | & G_{rs} P_s \\ \hline G_{rs} & | & G_{rs} \end{bmatrix} \quad (12)$$

и входящие в (4), также будут невырожденными, поскольку подматрицы  $E_m P_s$  и  $E_r P_r$  диагональные и невырожденные. Причем подматрица  $G_{rs}$ , входящая в (12), представляет собой невырожденную матрицу Якоби

Учитывая (7), (8), (9), (12), выражение (4) представим в виде

$$\begin{aligned} \Delta q'_s P_s - \Delta P'_s (G'_{rs} P_s + G'_{rs} P'_s) + \Delta G'_s G_{rs} &= \\ + \Delta q'_r P'_r - \Delta P'_r (G'_{rs} P_s + G'_{rs} P'_r) + \Delta K'_r G_{rs} P'_r &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$G_{rs} = \frac{1}{2} [A_{rs}] [E_s K'_s Q'_s]^{-1} [E_s (Q'_s)^2],$$

$$G_{rs} = \frac{1}{2} [A_{rs}] [E_s K'_s Q'_s]^{-1} [E_s (Q'_s)^2].$$

Поскольку подобная схема физически не существует, то модифицированная форма теоремы Телледжена [2] представляет определенную свободу в выборе параметров в этой схеме. Воспользуемся этим и выберем параметры подобной схемы таким образом, который позволил бы достаточно эффективно определить искомые параметры чувствительности  $\Delta P_k$  через реакции и сходной схемы ГТС. С учетом требований рассматриваемой задачи параметры  $P'_s$  могут быть выбраны таким образом, чтобы можно было из (13) найти  $\Delta P_s$ . Для этого примем в (13) параметры подобной схемы  $P'_r = 0$ , тогда появляется возможность определения  $\Delta P_s$ . Параметры  $P_s$  подобной схемы выбираются таким образом, чтобы они удовлетворяли следующей системе линейных алгебраических уравнений:

$$G'_{rs} P_s = e_s, \quad l = k = \overline{1, m}, \quad (14)$$

где  $e_s$  — единичные векторы-столбцы:

$$e_1 = [1, 0, \dots, 0], \quad e_2 = [0, 1, 0, \dots, 0], \dots, e_m = [0, 0, \dots, 1, 0].$$

Поскольку матрица  $G_{jk}$  невырожденная, то

$$P_k^* = [G_{jk}^{-1}] e_k, \quad j = k = \overline{1, m}. \quad (15)$$

С учетом выбранных параметров  $P_k^*$  и  $P_k$  подобной схемы уравнение (13) значительно упрощается

$$\Delta P_k = -G_{jk}^{-1} G_{jr} \Delta P_r - G_{js}^{-1} G_{st} \Delta R_t - G_{js}^{-1} \Delta q_s. \quad (16)$$

После определения вектора поправок можно осуществить коррекцию этого режима

$$P_{k\text{кор}} = P_k^* + \Delta P_k, \quad k = \overline{1, m}, \quad (17)$$

$$P_{r\text{кор}} = P_r^* - \Delta P_r, \quad r = \overline{m+1, s}. \quad (18)$$

После нахождения по (17) и (18) скорректированных значений узловых давлений определяются скорректированные значения потоков газа на участках  $Q_j^*$  по уравнениям состояния газопроводных участков и участков с КС. Скорректированные значения узловых расходов (подачи)  $q_j^*$  определяются из балансовых уравнений потоков газа, составленных относительно балансирующих  $r = m+1, m+2, \dots, s$  узлов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аюлян С. Г. Метод коррекции потокораспределения установившихся режимов систем транспорта газа // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1991. — № 1. — С. 178—186.
2. Аюлян С. Г. Модифицированная форма теоремы Телледажена применительно к гидравлическим цепям систем транспорта газа // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. 1989. — Т. 42, № 2. — С. 64—67.
3. Аюлян С. Г. Расчет потокораспределения стационарного режима газотранспортной системы // Проблемы совершенствования и развития прогрессивных технико-экономических норм и нормативов в газовой промышленности: Сб. науч. тр. ВНИИГазопром. — М., 1982. — С. 81—91.
4. Пароди М. Локализация характеристических чисел матриц и ее применение. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. — 161 с.

УДК 62.50

Р. Е. САРКИСЯН

АДАПТИВНЫЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ  
ДЛЯ ДИАЛОГОВЫХ СИСТЕМ

## Сообщение 2. МЕТОД ПРОИЗВОДНЫХ ПО НАПРАВЛЕНИЮ

Излагается метод построения человеко-машинных процедур адаптивного типа для решения практически многокритериальных задач, основанный на представлении предельных отношений замещения через производные критериальных функций по направлению и процедуре интервального их оценивания.

Библиограф.: 8 назв.

Բնականորեն է տեխնիկական և կազմակերպական բնույթի բարդ նպատակադրերի նախագծման, պլանավորման և կառավարման գործնական բազմաշախատանքային օպտիմիզացիայի խնդիրների լուծման նոր մեթոդ՝ հիմնված համարվող բնույթի մաթ. մեթոդների վրա ընթացակարգերի օգտագործման վրա: Երկրորդության ընթացակարգը կառուցվում է, ելնելով տեխնիկային ֆունկցիաների ըստ ուղղության ածանցյալների հաշվարկությունից և ոչ մեկան տեղեկատվական օգնությունը նրանց գործառնական նախընտրելի տիրույթների զննչությունը հետազոտությունից: Բնականորեն էն նաև մեթոդի մեթոդական իրականացման հարցեր:

В [1], развивая подход, основанный на идее выявления предпочтений одновременно с исследованием множества допустимых решений многокритериальной задачи, была доказана возможность представления маргинальных коэффициентов замещения через отношения производных критериальных функций по направлению. Для дифференциальных функций производные по направлению заменялись скалярными произведениями градиентов критериальных функций на направление.

В настоящей работе излагаются концептуальные основы построения человеко-машинной процедуры адаптивного типа с привлечением информации о производных по направлению и соотношений, связывающих их с соответствующими характеристиками формализованной модели.

Рассмотрим следующую многокритериальную задачу при определенности. Пусть  $x \in D \subset E^n$  — вектор конструктивных параметров системы, возможные значения которых ограничены множеством  $D$ ,  $f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))^T$  — вектор критериев, значения которых желательно максимизировать,  $F = \{f \in E^m \mid f = f(x), x \in D\}$  — множество векторных оценок,  $\pi F = \{f \in F \mid \forall \varphi \in F, \varphi \succ f \Rightarrow \varphi = f, \forall \varphi \in F\}$  — эффективная граница  $F$  (множество эффективных решений, область Парето),  $\pi D = f^{-1}(\pi F)$  — соответствующее множество эффективных решений,  $u: E^m \rightarrow E^1$  — многомерная функция полезности, описывающая структуру предпочтений лица, принимающего решения, которая в явном виде не задана. Предполагается, что множество  $D$  выпукло, замкнуто и ограничено, функции  $f_l(x)$ ,  $l = 1, \dots, m$ , вогнуты и непрерывно

дифференцируемы в  $D$ , а  $u$  — монотонно возрастающая вогнутая непрерывно дифференцируемая функция. При этих условиях, как известно, множество  $\pi F$  непусто и ограничено [2]. Задача заключается в выборе наиболее предпочтительного решения в множестве  $\pi D$ .

Пусть  $\nabla u = \sum_{i=1}^m (\partial u / \partial f_i) \nabla f_i(x^1)$  — градиент функции  $u$ ,  $\nabla f_i(x^1)$  — градиент функции  $f_i(x)$ ,  $i = 1, \dots, m$  в точке  $x^1$ ,  $e = \nabla u / \|\nabla u\|$ . При построении формализованной модели решения поставленной задачи будем исходить из следующей системы аксиом:

- а)  $\|e\| = 1$ ;
- б)  $\exists \delta > 0$ ,  $x^1 + ze \in D$ ,  $\forall z \in (0, \delta)$ ,  $x^1 \in D$ ;
- в)  $e = \arg \max \Phi(d)$ ;
- г) если  $x^1 \notin E$ , то  $f_i(x^1 + ze) > f_i(x^1)$ ,  $i = 1, \dots, m$ , и  
 $\exists R_i: f_i(x^1 + ze) > f_i(x^1)$ , если же  $x^1 \in \pi D$ , то  
 $f_i(x^1 + ze) > f_i(x^1)$ ,  $i \in R_i \subset \{1, \dots, m\}$ ;
- д)  $\varphi_i \in [A_i, B_i]$ ,  $i = 1, \dots, m$ .

Аксиомы а) — д) интерпретируются следующим образом. Первая из них является условием нормировки, а вторая означает, что  $e$  допустимо. Аксиома в) требует, чтобы  $e$  являлось решением некоторой оптимизационной задачи. Согласно аксиоме г), в точках, не являющихся эффективными, перемещение по  $e$  не приводит к ухудшению значений критериев. В эффективных же точках, которые не считаются наиболее предпочтительными, есть подмножество критериев  $R_i$ , значения которых не должны быть ухудшены при движении вдоль  $e$ . Наконец, аксиома д) предполагает, что с помощью дополнительной информации могут быть определены нижние и верхние границы маргинальных коэффициентов замещения  $\varphi_i = \nabla f_i(x^1)^T e / \nabla f_i(x^1)^T e$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $i \neq j_x$  [1]. Среди возможных направлений  $e$  обладает тем свойством, что функция  $\varphi(d) = \nabla u^T (\nabla f(x^1 + zd)) / d$  достигает в точке  $x^1$  своего максимума при  $d = e$ . Следовательно,  $e$  можно определить из задачи

$$\nabla u^T d \rightarrow \max_{d \in \pi D}, \quad (1)$$

где  $\pi D$  — совокупность ограничений на  $d$ . Учитывая, что  $u$  является сложной функцией  $x$ , задачу (1) можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^m (\partial u / \partial f_i) \nabla f_i(x^1)^T d \rightarrow \max_{d \in \pi(d)}, \quad (2)$$

Решение ее не изменяется, если в ней целую функцию разложить на  $\partial u / \partial f_{j_x} > 0$ , где  $f_{j_x}$  — критерий, выбранный в качестве опорного.

Так как получаемые при этом отношения  $(\partial u / \partial f_i) / (\partial u / \partial f_{i_0})$  являются коэффициентами замещения  $r_{i, i_0} = \nabla f_i(x^*)^T e / \nabla f_{i_0}(x^*)^T e$ , в результате такого действия вместо (2) получаем задачу

$$\sum_{i=1}^m (\nabla f_i(x^*)^T e / \Delta f_{i_0}(x^*)^T \cdot \nabla f_i(x^*)^T d) = \max_{d \in P, d^T e = 1} \quad (3)$$

Следовательно, фигурирующая в аксиоме в) функции  $\Phi(d)$  равно выражению  $\sum_{i=1}^m (\nabla f_i(x^*)^T e / \nabla f_{i_0}(x^*)^T e) \cdot \nabla f_i(x^*)^T d$ . Она зависит как от направления  $d$ , так и от его оптимального значения  $e$ , т. е.  $\Phi(d) = \Phi(e, d)$ . Экстремальное значение  $\Phi(e, d)$  равно  $\Phi(e, e) = e^T H e / S^{1/2} e$ , где  $S^{1/2} = \nabla f_{i_0}(x^*)$ ,  $H$  — симметричная положительно определенная матрица порядка  $(n \times n)$  с элементами  $h_{pq} = \sum_{i=1}^m (\partial f_i / \partial x_p) (\partial f_i / \partial x_q)$ ,  $p, q = 1, \dots, n$ . Пусть  $G_0 = G_0(x^*; d)$  — коническая аппроксимация множества  $D$  в точке  $x^*$  [3]. Согласно аксиоме г) направление  $e$  принадлежит одному из множеств  $F_0 = \{d | f_i(x^* + \varepsilon d) \geq f_i(x^*), i = 1, \dots, m\}$  или  $F_0^* = \{d | f_i(x^* + \varepsilon d) \leq f_i(x^*), i \in R_1\}$  в зависимости от того, принадлежит ли  $x^*$  множеству  $=D$  или нет. Условия, фигурирующие в описании  $F_0$  или  $F_0^*$ , легко интерпретировать в терминах производных по направлению функций  $f_i(x)$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Действительно, используя разложение [3]

$$f_i(x^* + \varepsilon d) = f_i(x^*) + \varepsilon \nabla f_i(x^*)^T d + \varepsilon^2 \{d\} \alpha_i(x^*; \varepsilon d), \quad (4)$$

где  $\alpha_i(x^*; \varepsilon d) \rightarrow 0$  при  $\varepsilon \rightarrow 0+$ , и исходя из эквивалентности условий  $f_i(x^* + \varepsilon d) \geq f_i(x^*)$  и  $(f_i(x^* + \varepsilon d) - f_i(x^*)) / \varepsilon \geq 0$  для  $\varepsilon > 0$ , приходим к выводу, что имеет место  $\nabla f_i(x^*)^T d = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0+} (f_i(x^* + \varepsilon d) - f_i(x^*)) / \varepsilon = \nabla f_i(x^*)^T d \geq 0$ . Если при этом для некоторого возможного направления  $d$  имеет место  $\nabla f_i(x^*)^T d > 0$ , то существуют  $\varepsilon > 0$  такие, что  $f_i(x^* + \varepsilon d) > f_i(x^*)$ ,  $\varepsilon \in (0, \varepsilon)$ , т. е.  $d$  является направлением возрастания  $f_i(x)$  в точке  $x^* \in D$ .

Целевая функция  $\Phi(e, d)$  в (3) содержит маргинальные коэффициенты замещения  $r_{i, i_0} = \nabla f_i(x^*)^T e / \nabla f_{i_0}(x^*)^T e$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Аксиома д) предполагает возможность оценивания нижних и верхних границ  $r_{i, i_0}$  с помощью определенной корректной процедуры. Для построения такой процедуры оценивания будем исходить из подхода, предложенного Майер-Ротом и Стэнкардом [8]. Суть его заключается в следующем. Пусть  $f^1, f^2 \in F$  таковы, что  $f^2 = f^1 + f^3$ ,  $v = 1, \dots, m$ ,  $v \neq i$ ,  $f^1_v = f^2_v - \Delta f_v$ ,  $f^2_v = f^3_v + \Delta f_v$ , где  $f^3_v \geq f_v(x^*)$ ,  $v = 1, \dots, m$ , и ЛП отдает предпочтение оценке  $f^1$ . Тогда  $r_{i, i_0} \leq \Delta f_{i_0} / \Delta f_i$ . Если же предпочтение отдается оценке  $f^2$ , тогда  $r_{i, i_0} \geq \Delta f_{i_0} / \Delta f_i$ . Пусть

теперь величины  $\Delta f_{j_k} > 0$  такова, что разница в полезности векторных оценок  $(f_1^k, \dots, f_m^k)^T$  и  $(f_1^k, \dots, f_{j_k}^k + \Delta f_{j_k}, \dots, f_m^k)^T$  для ЛПР очевидна. Выберем величины  $0 < \Delta f_{j_1} < \Delta f_{j_2} < \dots < \Delta f_{j_m}$  такими, что по мнению ЛПР оценка  $(f_1^k, \dots, f_{j_1}^k + \Delta f_{j_1}, \dots, f_m^k)^T$  менее предпочтительна, а оценка  $(f_1^k, \dots, f_{j_1}^k + \Delta f_{j_1}, \dots, f_{j_2}^k + \Delta f_{j_2}, \dots, f_m^k)^T$  более предпочтительна, чем  $(f_1^k, \dots, f_{j_1}^k + \Delta f_{j_1}, \dots, f_{j_2}^k + \Delta f_{j_2}, \dots, f_m^k)^T$ . Тогда  $\Delta f_{j_1}/\Delta f_{j_2} < \rho_{12} < \Delta f_{j_2}/\Delta f_{j_3}$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $i \neq j_k$ . Используемая в этом подходе элементарная операция по переработке ЛПР информации по существу сводится к сравнению полезности значений оценок на шкалах двух различных критериев при фиксированных значениях остальных  $m-2$  критериев и оценивается как допустимая (с точки зрения возможности ЛПР), а процедура, использующая эту операция—корректная [4].

Пусть

$$P_0 = \{d = e[S^{j_k}]^T e | S^{j_k} e \in \{A_i, B_i\}, i = 1, \dots, m\},$$

где  $S^i = \nabla f_i(x^k)$ ,  $V_i$ .

Множество  $P_0$  будем называть конусом предпочтения.

Приведенные соотношения позволяют получить два альтернативных пути решения задачи (3). Один из них приводит к задаче робастного программирования [5]

$$\sum_{i=1}^m \rho_{ij_k} \nabla f_i(x^k)^T d \rightarrow \max, \quad (5)$$

$$d \in G_0 \cap (P_0 \vee F_0'), \|d\| = 1, \\ \rho_{ij_k} \in [A_i, B_i], i = 1, \dots, m$$

Формально по отношению к задаче (5) может быть применен принцип слияния Беллмана-Заде. С другой стороны, применение процедуры Сойстера [5] позволяет преобразовать задачу (5) с ограничениями по включению в задачу математического программирования с ограничениями типа неравенств. Второй путь связан с заменой в выражении  $\Phi(e; d)$  искомого экстремального решения  $e$  на  $d$  и добавлением к ограничениям  $G_0 \cap (F_0 \wedge F_0')$  конуса предпочтения  $P_0$ . В результате такой замены получаем задачу

$$\Phi(d; d) = d^T H d / S^{j_k} p \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$d \in P_0 \cap G_0 \cap (F_0 \vee F_0') \\ \|d\| = 1$$

Числитель и целевой функции в (6) обусловлен выражением  $\sum_{i=1}^m [\nabla f_i(x^k)^T d]^2 > 0$  и является положительно определенной квадратичной формой. Соответствующим выбором  $f_{j_k}$  можно добиться также выполнения условия  $S^{j_k} d > 0$ . Функция  $\Psi(d; \beta) = d^T H d - \beta S^{j_k} d$  выпукла для любого  $\beta \geq 0$ . Пусть  $d^1, d^2$  и  $d = \alpha d^1 + (1 - \alpha) d^2$ ,  $\alpha \in (0, 1)$

удовлетворяют ограничениям задачи (6). Тогда, полагая  $\beta = \max\{\Phi(d^1; d^1), \Phi(d^2; d^2)\}$ , приходим к выводу, что  $\Phi(d; d) \leq \beta$ , т. е.  $\Phi(d; d) \leq \beta$ . Следовательно, функция  $\Phi(d; d)$  квазивыпуклая. Если ограничения задачи (6) задают многогранное множество, то, как известно [3], среди ее оптимальных решений существует экстремальная точка этого множества.

Если решение задачи (6) уже найдено, движение вдоль него можно организовать с помощью одного из традиционных методов линейного подъема [3]. Например, величина оптимального шага  $z^*$  может быть вычислена на основе правил  $z^i = \min\{z^i; z^i = \arg \max f_i(x^i + ze)\} \times (x^i + ze)$ ,  $i = 1, \dots, m$  или  $z^i = \arg \max f_{i^*}(x^i + ze)$  при  $0 < z \leq z_{\max}$ , где  $z_{\max} = \max\{z | x^i + ze \in D\}$ . Сочетая неформальную процедуру А. Джозефсона [6] по вычислению  $z^*$  с анализом функции  $\mu_i(z)$  и  $\sigma_i(z)$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $0 < z \leq z_{\max}$ , можно выбрать наиболее приемлемую величину  $z^*$  в интерактивном режиме.

Результаты итерации является решение  $x^{i+1} = x(z^*) = x^i + z^*e \in D$ . Для задачи линейного или выпуклого программирования условия  $x^k \in \pi D$  имеет место тогда и только тогда, когда  $x^k$  совпадает с решением задачи  $\sum_{i=1}^m f_i(x) \rightarrow \max$  при  $f_i(x) \geq f_i(x^k)$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Для невыпуклых задач можно воспользоваться следующей теореме Гермейера, утверждающей о существовании величин  $\alpha_i \geq 0$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ , для которых имеет место условие  $\min_{x \in D} \sum_{i=1}^m \alpha_i f_i(x^k) \geq \min_{x \in D} \sum_{i=1}^m \alpha_i f_i(x)$ ,  $x \in D$  [2].

Если  $x^i \notin \pi D$  необходимо выбрать новый опорный критерий  $f_{i^*}$ , формировать множества  $G_0$ ,  $P_0$  и  $R_0$  и повторить вычисление  $e = d^i$  и  $z^*$ . Если же  $x^i \in \pi D$  и считается наиболее предпочтительным, то исходная задача решена, в противном случае необходимо формировать множество  $R_1$  и продолжать поиск с новыми данными относительно  $f_{i^*}$ , множеств  $G_0$ ,  $P_0$  и  $R_0$ . Каждая итерация человеко-машинной процедуры содержит фазу оптимизации и фазу анализа и принятия решения. В результате работы алгоритма происходит адаптация двух типов: ЛПР к задаче и ЭВМ к системе предпочтений ЛПР. Генерируемая при этом последовательность  $\{x^k\}$ ,  $k = 1, 2, \dots$  сходится к наиболее предпочтительному решению из  $\pi D$ . Реализация метода в решении практических задачи показывает, что сходимость достигается за 4—5 итераций. В основе машинных BASIC-программ положены алгоритмы комплексного метода SUMT Фиажко и Маккорника [7]. На основе метода разрабатывается диалоговый пакет программ, совместимый с стандартными программными средствами САПР и АСНИ.

# Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Саркисян Р. Е. Адаптивные человеко-машинные процедуры для диалоговых систем. 1. Маргинальные отношения замещения и производные критериальных функций по направлению. Изв. АН Армении. Сер. ТН.—1991.—Т. 44, № 4.—С. 184—189.
2. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач.—М.: Наука, 1982.—254 с.
3. Бизари М., Шетти К. Целочисленное программирование. Теории и алгоритмы.—М.: Мир, 1982.—583 с.
4. Емельянов С. В., Ларичев О. М. Многокритериальные методы принятия решений.—М.: Знание, 1985.—32 с.
5. Негойце К. Применение теории систем к проблемам управления.—М.: Мир, 1981.—350 с.
6. Джоффрисон А., Дайер Дж., Файнберг А. Решение задач оптимизации при многих критериях на основе человеко-машинных процедур. Кн.: Вопросы оптимизации и процедуры принятия решения.—М.: Мир, 1976.—С. 126—145.
7. Банди Б. Методы оптимизации.—М.: Радио и связь, 1988.—128 с.
8. Muler-Rotha C., Stankard Jr. M. F. A Linear Programming Approach to choosing between multi-objective alternatives. 117-th Math. Program Symp., The Hague sept. 1970, P. 165—172.

ЕрПИ

20. XI, 1990

УДК 658.5.122.621.382.33:621.314.572.

А. А. ВАРДАНЯН, Г. А. МАКАРЯН, А. С. ШАБОЯН

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ОПТИМАЛЬНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ДИОДОВ ДЛЯ РАБОТЫ В ИНВЕРТОРНЫХ СХЕМАХ

Обсуждены особенности работы транзисторных ключевых элементов в инверторных схемах с точки зрения работы в инверсных режимах. Проведен анализ принципов создания на базе гибридной и интегральной технологий быстродействующих диодов в составе транзисторного ключа с обратной проводимостью.

Обсуждаются также различные пути повышения быстродействия и регулирования характеристик обратного восстановления диодной части структур.

Ил. 3. Библиогр.: 6 назв.

Քննարկված է և շրջագծով սխեմաներում տրանզիստորային բաղադրիչների աշխատանքային առանձնահատկությունները հակադարձ ուժիմում աշխատելու, տեսակետից, Կատարված է հակադարձ ճառագրականությանը տրանզիստորային բաղադրիչների կազմում հիբրիդային և փնաեղրային տեխնոլոգիաների հիման վրա տրապ վերականգնվող դիոդների ստեղծման վերլուծություն: Քննարկված են նաև կառուցվածքի դիզայնին մասին արագագործության բարձրացման և հակադարձ վերականգնման բնութագրերի կարգավորման ամրորելու ուղիները:

Транзисторные ключевые элементы с обратной проводимостью могут быть использованы в целом классе силовых инверторных схем, где силовой транзистор шунтируется встречно-параллельным быстродействующим диодом [1].

В мостовых и полумостовых схемах транзисторных инверторов, являющихся основным узлом регулируемого электропривода, при работе на активно-индуктивную нагрузку возникают инверсные режимы работы у ключевого транзистора. При этом амплитуда инверсного тока из-за свойства индуктивности сохранять величину тока почти равняется амплитуде прямого тока. У дискретных силовых транзисторов способность пропускания инверсного тока существенно ниже по сравнению с величиной прямого тока. В связи с этим практически во всех схемах силовых инверторов силовые транзисторы шунтируются обратно включенными диодами, предназначенными для пропускания обратных токов инверторной цепи.

На практике в транзисторных ключах с обратной проводимостью быстродействующий диод в цепи «коллектор-эмиттер» транзистора подключается либо по гибридной технологии, либо создается интегрально на основе коллекторного перехода  $p-n-n^+$  транзисторной структуры. При этом  $p-n-n^+$  диодная структура создается по периферии, либо в центре транзисторной структуры (рис. 1), а высокое быстродействие достигается путем локального электронного об-

лучения диодной части структуры [2, 3], либо локальной диффузией атомов золота или платины.

Основные требования к параметрам встречно-параллельного диода определяются особенностями рекуперативных процессов при инвертировании напряжения в мостовых схемах и свойствами самого биполярного транзистора. Они сводятся к обеспечению минимального прямого падения  $U_F$  при максимальном значении прямого тока диода  $I_F$  и минимальном значении времени восстановления  $t_{RR}$ . Для безопасной работы транзисторов чрезвычайно важна форма и амплитуда тока  $I_{RR}$  при обратном восстановлении диода.

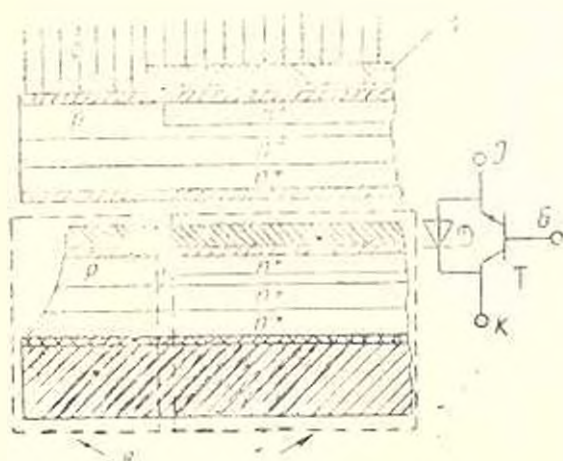


Рис. 1. Схема подключения быстродействующего диода в цепь «коллектор-эмиттер» транзистора и поперечный разрез  $p-n-p-n$  транзисторной структуры с  $p-n-p$  диодом, созданным по периферии на основе коллекторного перехода

В последнее время появление новых видов быстродействующих ключевых элементов — биполярных, биполярно-полевых IGBT и MOSFET транзисторов стимулировало существенное повышение рабочих частот электроприводов для регулирования скорости двигателей. Повышение частотных характеристик диктовало нахождение новых концепций создания быстродействующих диодов, в том числе на основе принципа униполярного протекания тока [4].

На практике значение блокирующего напряжения быстродействующих диодов  $U_R$  для инверторных схем, непосредственно питающихся от сети 380 В, находится на уровне 900...1000 В, а значение максимального  $I_F$  — от десятка до сотни ампер [3]. При этом требование сохранения низкого значения  $U_F$  на уровне до 1...1,5 В сводится к тому, чтобы иметь минимально возможные значения толщины  $W_n$  и удельного сопротивления в  $n$ -слое базы диода, обеспечивающего  $U_{ao}$  при сохранении большого значения диффузионной длины дырок  $L_p$  в этом слое.

Форма тока обратного восстановления диода схематически показана на рис. 1. Обычно пиковое значение  $I_{RR}$  бывает равным по величине  $I_F$ . Этот ток протекает через транзисторы, увеличивая их рассеиваемую мощность и вероятность пробоя.

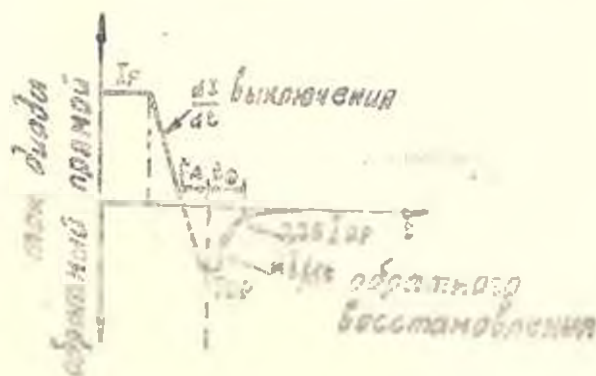


Рис. 1. Форма тока обратного восстановления диода.

Обратное восстановление диода—это процесс, при котором прибор переключается из открытого состояния в состояние обратного блокирования. Для реализации этого перехода из  $n^-$  области должен быть удален весь накопленный избыточный заряд неосновных носителей. Снятие накопленного заряда протекает за счет двух процессов—протекания обратного тока и рекомбинации. Традиционно наиболее простой подход регулирования скорости переключения диода—это создание в  $n^-$  области базы рекомбинационных центров. Исходя из принципа управления зарядом, можно написать следующее приближенное соотношение между плотностью инжектированных в  $n^-$  слое шириной  $W_n$  носителей  $\Delta n$  и прямого тока  $I_F$ :

$$\Delta n = \frac{\tau_p}{e W_n} I_F \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона.

Из этого уравнения следует, что если высокий уровень жизни дырок  $\tau_p$  при инжекции уменьшается, средняя плотность носителей в  $n^-$  области пропорционально понижается. С другой стороны для заряда  $\Delta Q$ , накопленного в  $n^-$  области, можно написать

$$\Delta Q = 2e W_n \Delta n \quad \text{или} \quad \Delta Q = \tau_p I_F \quad (2)$$

Если форму импульса тока обратного восстановления на рис. 2 аппроксимировать как треугольник с базой  $(t_A + t_B)$  и высотой  $I_{RR}$ , то заряд обратного восстановления представляется

$$Q_{RR} = \frac{1}{2} I_{RR} (t_A + t_B) \quad (3)$$

Приравнивая заряд обратного восстановления с накопленным зарядом, нетрудно получить соотношение между временами обратного восстановления и жизни  $\tau_p$ :

$$t_{\text{об}} = (t_1 + t_2) = 2 \frac{\tau_p I_C}{I_{\text{до}}} \quad (4)$$

Уменьшение времени жизни до требуемого уровня может быть осуществлено несколькими технологическими способами. Среди множества возможных подходов наиболее хорошо известны диффузия золота и платины, а также использование высокоэнергетического электронного облучения. Эксперименты показывают, что наилучшее сочетание параметров получается при легировании золотом и относительно хуже — при электронном облучении. Вместе с тем использование электронного облучения при температурах порядка 300°C дает неплохие результаты с точки зрения получения приемлемого компромисса между характеристиками диода [5].

На процессы обратного восстановления диодов могут также повлиять физические процессы, происходящие в области омических контактов со стороны анода и катода. Обычно в контакт к катоду в  $p-n-n$  структура диода создается сгруппированным  $n$  слоем. Внутреннее  $p-n$  переходное  $n-n$  перекрестие создает омический контакт для основных носителей. Этот контакт беспрепятственно позволяет переходу электронов из  $n$ -области в  $n$ -область и создает внутреннее электрическое поле  $E$  из-за градиента концентрации доноров  $N_D$  на границе  $p-n$  перехода

$$E = \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{N_D} \cdot \frac{dN_D}{dx} \quad (5)$$

где  $\frac{kT}{q}$  — тепловой потенциал.

В работе [6] была предложена конструкция прозрачного для обоих типов носителей омического контакта со стороны катода, который беспрепятственно способен пропускать и дырки, и электроны, состоящий из чередующихся  $n$  и  $p$ -областей мозаичного типа со стороны катода. В предложенной конструкции  $p$ -область обеспечивает омический переход дырок.

Двухключевой транзисторный модуль МТКД2-20 на постоянный ток 20 А напряжением 900 В содержит интегральные обратные диоды в центрах транзисторных структур, имеющих время обратного восстановления менее 500 нс.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шабоян С. А., Бардикин А. А., Тателосян Р. Г. Силовые биполярные транзисторы и транзисторные модули // Электротехника. — 1988. — № 5 — С. 30—33.
2. А. с. 1202458 СССР, МКН НОИ 21/44. Способ изготовления силовых транзисторов / А. А. Бардикин, Р. Г. Тателосян (СССР). — № 3667933/24—25; Заяв. 30.11.83; Опубл. 01.09.85.

3. Варданян А. А. и др. Силовые быстродействующие диоды ДЧ135//Промышленность Арменик—1988.—№ 8.—С. 59—61.
4. Baliga B. J., The pinch rectifier: A low forward drop high speed power diode//IEEE Elec. Dev. Lett., EDL.. 1984—5 — p. 194—196.
5. Baliga B. J., Sun E. Comparison of gold, Platinum and electron irradiation for controlling lifetime in power rectifiers//IEEE Trans. Elec. Dev. ED 1977—24 — p. 685—688.
6. Amentjan J., Suge'a T., Mizushima J. Novel low-loss and high speed diode utilizing an ideal ohmic contact//IEEE Trans. Elec. Dev, ED 1982—29 — p. 236—243.

## СОДЕРЖАНИЕ

XLIV том «Известия АН Армении (серия технических наук)»

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

- С. А. Гаспарян, М. В. Арутюнян. Оптимальная разбивка передаточного отношения многоступенчатого цилиндрического редуктора 4—103
- Г. Ш. Грдцян, Н. П. Ренне. Коррективы к анализу процесса реверсивной вытяжки 2—36
- Р. Ш. Джавахя, Н. Г. Дамцелян, Ю. А. Акопян, Г. Д. Стойким, Т. Д. Карапетян. Брикетирование металлической стружки с использованием полимерных связующих 1—8
- Л. М. Мурадян, В. А. Варданян. О возлущении углеродистых сталей при высоких температурах 4—169
- Н. Р. Овакимян. Применение морфологического анализа и исследование результатов при выборе вариантов проситирования конструкции и технологических процессов 3—97
- М. Г. Стакян, А. С. Мнацаканян, Т. Э. Джрбамян. Расчетная оценка трещиностойкости валов передаточных механизмов по периодам усталостного разрушения 4—156
- К. Г. Степанян, Г. С. Айрапетян, К. С. Арзуманян. Динамический синтез механизмов по максимальному значению радиуса ускорения 1—3
- К. Г. Степанян, С. С. Арутюнян, С. Ш. Шахпаронян. Пространственный циклоидальный рычажных механизмов 2—51
- Р. Г. Кеосишарян, М. Г. Хачикян. Экспериментальное исследование саморазогрева биморфных пьезоэлектрических приводов 5—207

### РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Н. С. Арамян. Чувствительность кремниевого МДП-фотоприсемника в режиме равновесного обеднения приповерхностной области полупроводника 2—24
- Б. Л. Аревшатян, Н. Э. Григорян. Коэффициент гармоник записывающей головки 2—78
- А. Ш. Арутюнян, С. М. Карапетян. Стабилизированный источник тока для питания сверхпроводящего электромагнита квантового усилителя 1—42
- Р. А. Симонян, О. А. Мартиросян. Двухканальный источник эталонного излучения ИК—диапазона длин волн 4—200

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- А. В. Алексеевский. К определению зоны оптимального проектирования катушек низковольтных электромагнитных аппаратов постоянного тока 3—117
- Н. Г. Нижиан. Уравнения напряжений трехфазной асинхронной машины с несимметричной короткозамкнутой клеткой ротора 1—25

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- С. В. Антоян, Р. Г. Алмоян, А. С. Дамцелян, А. А. Алмоян. Алгоритмы и программа расчета процесса ректификации многокомпонентной смеси в тарельчатой колонне 1—38

- В. В. Бисдасарян. Составление математических моделей процессов получения кислот в зависимости от режимов в зоне реакции . . . 2—70
- А. А. Варданян, Г. А. Макарян, С. А. Шабоян. Сравнительный анализ принципов оптимального конструирования быстродействующих диодов для работы в инверторных схемах . . . 5—6—288
- К. С. Карапетян. Имитационная модель ЛВС с централизованным контролем . . . 2—65
- Г. Г. Гархиян, А. А. Терещенко, П. Г. Хачиян. Определение числа и мест установки локальных вычислительных сетей . . . 3—121
- Р. Р. Цугурян. Спектральный анализ многомерных сигналов . . . 2—61
- И. Г. Хачиян, А. Г. Гархиян. Определение последовательности включения транспортных станций в кольцевую локальную вычислительную сеть . . . 5—232

## НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- И. Г. Азарян. ВЧ метод абсолютного измерения . . . 3—133
- С. С. Гюнашян, Е. А. Айрапетян, А. А. Минасян. Относительная дальность ЛВС-1200 . . . 4—193

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

- А. А. Гаспарян, А. Г. Манукчян, Б. Ю. Гаспарян. Расчет конического элемента акустического элемента звукопоглощающей конструкции . . . 3—106
- Г. В. Бадеян, С. А. Амбарцумян, И. А. Муридджанян. Анализ температурных деформаций при контакте с цирелем монолитных бетонных и железобетонных конструкций . . . 4—175
- Р. А. Катыкян, К. А. Саакян. Продольные монолитные железобетонные плиты перекрытий в зданиях, возводимых методом подъема . . . 4—179
- Р. С. Минасян. Определение деформационных напряжений в зонах оконного проема стеновой панели методом моментной деформации сечений . . . 1—179
- Р. С. Минасян, С. А. Давсян. Определение расчетных усилий в поперечной диафрагме крупнопанельных зданий, имеющей дверные или оконные проемы . . . 3—102

## ЭНЕРГЕТИКА

- С. Г. Акопян, М. С. Акопян. Оптимизация режимных параметров сложных газотранспортных систем . . . 1—17
- С. Г. Акопян, М. С. Акопян. Анализ чувствительности в расчетах потягкоррекции установившихся режимов . . . 6—277
- Р. А. Ажирикян, Р. Э. Мариносян, И. Н. Шарабханян. Определение режимов электрической системы по режимам ее электрических районов . . . 3—112
- Э. А. Эмелекян, В. П. Аракелян, Фидель Гиль. Об одном гибридном методе расчета установившегося режима электрической системы . . . 1—21

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- А. К. Карапетян. Особенности применения ПИМ и замкнутого привода постоянного тока . . . 4—189
- И. А. Матевосян, А. А. Оганесян, Э. С. Сафарян. Оптимальное управление режимом работы компрессорной станции магистрального газопровода . . . 3—131
- Р. Е. Саркисян. Адаптивные и неадаптивные процедуры для адаптивных систем. Сообщение 1. Маргинальные отношения чувствительности и производные критерияльных функций по параметрам . . . 4—184
- Р. Е. Саркисян. Адаптивные и неадаптивные процедуры для адаптивных систем. Сообщение 2. Метод предвидения по направлению . . . 6—282

- С. Е. Чимшикян, Е. А. Мероян. Построение моделей неопределенностей многосвязных динамических объектов для синтеза многорежимных САУ 3—126
- С. Е. Чимшикян. Концепция нормальной доминантности в задаче синтеза многосвязных систем автоматического управления 5—227

## ГИДРАВЛИКА И ГИДРОТЕХНИКА

- А. А. Гургенян. Акустический интерферометр фазового непроходящей жидкостью с пузырьками газа в электрическом поле 3—142
- С. М. Казарян, Э. К. Мурадян. Движение подвешенной в жидкости и слоестой толще без инфильтрации при откачке из верхнего и нижнего водоносных горизонтов 1—30
- Э. К. Мурадян. Фильтрация в многослойной толще без инфильтрации при малых и больших перепадах откачки через капиллярные и водоносные горизонты 1—36
- С. М. Мурадян. Учет капиллярности при расчете фильтрации в скважинах 6—245
- В. В. Осанесян. Исследование гидравлического сопротивления и обводнения в золотниках управления плунжерного типа 6—253
- В. С. Саркисян, А. Ж. Чигиш, А. А. Саргсян. Фильтрация жидкостей, содержащих взвешенные и растворенные вещества на радиальных фильтрах 5—236
- А. А. Саруханян. К расчету потерь энергии несжимаемой вязкой жидкостью при вращательном течениях в скважинах 5—240
- А. А. Саруханян. Нестационарное течения в скважинах с переменным уровнем жидкости в цилиндрической трубе 6—259
- Э. А. Хачатурян. Прогноз режима подземных вод методом математического моделирования 5—249

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- С. С. Аветисян, В. Г. Гаджазян. Влияние скорости движения жидкости на гидравлическое сопротивление 7—255
- Р. Е. Аветисян, Р. М. Никоноров, С. Е. Саруханян, В. А. Аветисян. Определение потерь давления на трение при пневмотранспорте порошкообразных материалов в плотном слое 2—81
- О. А. Аветисян, В. Е. Арцгамян, М. С. Осипян, Г. А. Чалкян. Двухканальный монолитный акустоэлектронный конволвер 6—268
- Г. С. Геворкян. Взаимодействие зданий и сооружений с грунтом основания 2—85
- М. В. Касьян, Г. Б. Багдасарян, Г. А. Арутюнян. Выбор режима резания по оптимальной форме стружки при точении 2—90
- Л. Е. Саркисян, М. В. Мартиросян, Э. Р. Лилиоян, С. Г. Асатрян. Получение и свойства магнитномягкого композиционного материала с повышенной износостойкостью для сердечников магнитных головок 2—87
- А. Д. Саткян, О. И. Бротиковский, А. А. Варданян, А. П. Нирумян. Улучшение технологичности производства силовых транзисторов из оксида стекломезаппакации 1—14

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ի. Դ. Քննչկեւյան, Մ. Հ. Խաչիկյան. Երկշերտ պինդոլնկտրական շարժարեւերի ինքնառաքման փորձարարական հետազոտում                                                   | 207 |
| Կ. Լ. Ալվալյան, Դ. Ս. Բարայան, Հ. Գ. Բախշեւյան, Ջերմամշակումների աղղեցությունի ախտիցիումում օքսիդացման փաթեթավորման արատների առաջացման վրա                 | 211 |
| Ս. Կ. Աղբալյան, Հ. Ս. Ասատրյան, Հ. Շ. Մկրտչյան, Ի. Կ. Սամվելյան, Ս. Ա. Առիշա. Թուչի և տաշնդներին ստացված էռակալված սյուզպատի կառուցվածքը և հատկությունները | 216 |
| Ս. Լ. Ալվալյան, Ժ. Կ. Գոխոյան, Ս. Լ. Խուլպալեղյան. Նուրբ բաղադրությունների շերտերի լազերային վերաբյուրեղացման եղանակ                                       | 222 |
| Ս. Ե. Չլմիկյան. Նորմալ գերհիսող հատկանիշի ընդունումը բազմակապ ավտոմատ կառավարման համակարգերի համադրման խնդրում                                             | 227 |
| Ն. Հ. Խաչիկյան, Ա. Կ. Ֆարխանյան. Օղակային սիսի տնդային հաշվողական ցանցի տրանսպորտային կայանների միացման հաշվարկանության որոշումը                           | 232 |
| Պ. Ա. Սարգսյան, Ա. Ժ. Վրալյան, Ա. Ա. Սարգսյան. Կախված և էմուլսացված նյութեր պարունակող նեղուկների գոտումը շառավղային դոմինով                               | 236 |
| Ս. Ա. Սարգսյանյան. Անսնդմիջի մածուցիկ նեղուկի շերտերի կորուստի հաշվարկը Դարթ զուգահեռական շկայունացված ճնշումային շարժման դեպքում                          | 240 |
| Ս. Ա. Նուսիրյանյան. Հնչման սկզբնական դրագիներտի հաշվառումը գետնի համարժեքային շերտի եղանակում                                                              | 245 |
| Է. Հ. Խաչատրյան. Ստորգետնյա ջրերի ուժի մեծության կանխագուշակումը մաթեմատիկական մոդելավորման մեթոդով                                                        | 249 |
| Ս. Ս. Աղալյան, Թ. Լ. Դյուլյուղալյան. Ս. զծային երկրեւոով էլեկտրական շղթաները բեռնափոխող զինամիական մոդել                                                   | 255 |
| Լ. Ա. Սարգսյանյան. Կյուր դյանական խողովակում մեծապատասխան նեղուկի շհաստատված զուգահեռաշերտ շարժումը                                                        | 259 |
| Վ. Վ. Հովհաննիսյան. Սուզակային տիպի րաշխիշների հիդրավլիկական լուման և անսխեանժան հետազոտությունը                                                           | 263 |
| Հ. Ա. Համարաձումյան, Վ. Ս. Առաստամյան, Ս. Ս. Հովսեփյան, Գ. Ա. Վալիկյան. Երկուդի միաձույլ Լայնալեկտրոնային կոնվոլվեր                                        | 268 |
| Ս. Կ. Կյուրեղյան. Հեղուկի դանգվածի անուղղակի չափումները պահեստարաններում                                                                                   | 272 |
| Ս. Հ. Հսկոբյան, Մ. Ս. Հսկոբյան. Գազափոխադրման համակարգի հաստատված անժիմի հոսքարաշխման հաշվարկում ղգայնության վերլուծությունը                               | 277 |
| Ս. Ս. Սարգսյան. Հարմարվող մարդ-մեքենայական ընթացակարգեր երկրաբանության համակարգերի համար. Հաղորդում 2. Ըստ ուղղության ածանցյալների մեթոդ                   | 282 |
| Ս. Ա. Վարդանյան, Դ. Ա. Մակսյան, Ա. Ս. Նարոյան. Շրջադաշտի սխեմաներում գործող արագ վերականգնվող դիոդների շարժումը                                            | 285 |

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Р. Г. Кеоникарян, М. Г. Хачикян. Экспериментальные исследования саморазогрева биморфных пьезоэлектрических приводов                                               | 207 |
| Г. Е. Айвазян, Г. С. Бабин, А. Г. Бахшяцян. Влияние термообработок на образование окислительных дефектов упаковки в кремнии                                       | 211 |
| С. Е. Асбалаян, Г. А. Асигрян, Г. Г. Мкртчян, Р. Г. Самселян, С. А. Асиль. Структура и свойства спеченной стали, полученной из чугуниной стружки                  | 216 |
| А. Х. Авагян, Ж. Г. Дохоян, С. Х. Уйдавердян. Метод лазерной рекристаллизации тонких поликристаллических слоев                                                    | 222 |
| С. Е. Чилишкян. Концепция нормальной доминантности в задаче синтеза взаимосвязанных систем автоматического управления                                             | 227 |
| Н. Г. Хачикян, А. Г. Тарханян. Определение последовательности включения транспортных станций в кольцевую локальную вычислительную сеть                            | 232 |
| В. С. Саркисян, А. Ж. Чигчан, А. А. Саргсян. Фильтрация жидкости, содержащей взвешенные и эмульгированные вещества на радиальных фильтрах                         | 236 |
| А. А. Саруханян. К расчету потерь энергии несжимаемой вязкой жидкости при нестационарном плоскопараллельном напорном движении                                     | 240 |
| С. Ш. Нуридджиян. Учет начального градиента пьезры в методе эквивалентного слоя грунта                                                                            | 245 |
| Э. А. Хачатрян. Прогноз режима подземных вод методом математического моделирования                                                                                | 249 |
| С. С. Агаян, Р. Р. Гюльбудалян. Динамическая модель описания нелинейных ЛС электрических цепей с двухполюсником                                                   | 255 |
| А. А. Саруханян. Нестационарное ламинарное движение вязко-пластичной жидкости в круглой цилиндрической трубе                                                      | 259 |
| В. В. Оганесян. Исследование гидравлического защемления и облитерации в золотниках управления плунжерного типа                                                    | 263 |
| О. А. Амбарцумян, В. В. Арустамян, М. С. Осипян, Г. А. Чилишкян. Двухканальный монолитный акустоэлектронный конвольвер                                            | 268 |
| С. Г. Кюрегян. Косвенные измерения массы жидкости в резервуарах                                                                                                   | 272 |
| С. Г. Аюбян, М. С. Аюбян. Анализ чувствительности в расчетах погочасного распределения установившихся режимов систем транспорта газа                              | 277 |
| Р. Е. Саркисян. Адаптивные человеко-машинные процедуры для диалоговых систем. Сообщение 2. Метод производных по направлению                                       | 282 |
| А. А. Варданян, Г. А. Макарян, С. А. Шабоян. Сравнительный анализ принципов оптимального конструирования быстродействующих диодов для работы в инверторных схемах | 288 |