

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ  
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ  
ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ  
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Журнал издается с 1947 г.  
Выходит 6 раз в год на русском языке

Խ Մ Բ Ա Գ Բ Ա Վ Ա Ն Վ Ո Ւ Ե Գ Ի Ա

Չառլան Ի. Վ. (պատ. խմբագիր): Ադոնց Հ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղակալ):  
Ալեքսանիկի Վ. Վ., Անանյան Ա. Կ., Զադարյան Բ. Ա., Հակոբյան Բ. Ե.,  
Սարգսյան Յու. Լ., Ստակյան Ա. Գ., Տեր-Ազարի Ի. Ա.,  
Փիենայան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ):  
Փոստատեղեկություն: քարտուղար Առևտրային Զ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кисьян М. В. (ответ. редактор), Адоны Г. Т. (зам. ответ. редактора),  
Алексевацкий В. В., Ананян А. К., Аюпян Р. Е., Заполян М. А.,  
Пимаджян В. В. (зам. ответ. редактор), Саркисян К. Л.,  
Стакян М. Г., Тер-Азарьев И. А.  
Ответственный секретарь: Степанян Э. Կ.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Յ. Ա. ՄԱՆՎԵԼՅԱՆ

ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СКАЧКИ ПРИ ТРЕНИИ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Представления о природе фрикционного контакта, исходящие из предположения о наличии либо чисто упругой, либо упруго-вязкой деформации в зонах соприкосновения, оказались недостаточными для объяснения причины возникновения механических автоколебаний.

Установлено [1], что фрикционный контакт имеет упруго-вязкую природу, а в точках касания протекают явления, до некоторой степени аналогичные ползучести. Анализ особенностей взаимодействия соприкасающихся поверхностей, т. е. особенностей образования, изменения и разрушения отдельных точек контакта, изучение влияния обработки и геометрического состояния поверхностей трения позволили в значительной степени выявить влияние отдельных факторов на фрикционные характеристики пар трения.

В случае сухого трения при малых скоростях и отсутствии влияния температуры на фрикционные характеристики возбуждение механических автоколебаний и их величина обусловлены главным образом зависимостью силы трения покоя от продолжительности неподвижного контакта [2, 3].

Поскольку постоянно удельной силы трения (при сухом трении) обеспечивает изменение силы трения при сближении исключительно за счет роста фактической площади контакта, исследование статических фрикционных характеристик и, в частности, зависимости силы трения покоя от продолжительности неподвижного контакта может быть произведено на основе анализа формирования фактической площади контакта.

Рост силы трения вызван увеличением фактической площади контакта трущихся тел во времени, поскольку сила трения представляет собой произведение удельной силы трения  $\tau$  на величину фактической площади контакта  $A_f$ , т. е.:

$$T = \tau A_f \quad (1)$$

Величина фактической площади контакта зависит от реологических характеристик твердых тел, шероховатости, нагрузки и др. следующим образом [1, 2]:

$$A_r = A_a^{\frac{m}{\nu+m}} b^{\frac{m}{\nu+m}} \left( \frac{\nu+m}{B} \right)^{\frac{\nu}{\nu+m}} (1 - e^{-\beta t^p})^\nu N^{\frac{\nu}{\nu+m}}, \quad (2)$$

где  $\beta$  и  $p$  — коэффициенты, характеризующие реологическую природу контакта по Б. М. Равинскому и В. Г. Лютцау [4, 5];  $A_a$  — контурная площадь касания;  $m$  — коэффициент, характеризующий деформационные свойства материала;  $b$  и  $\nu$  — параметры опорной кривой;  $B$  — коэффициент, близкий к твердости по Майеру;  $t$  — время неподвижного контакта;  $N$  — нагрузка.

Выражение (2) характеризует не только влияние отдельных факторов на фактическую площадь касания, но и позволяет аналитически определить зависимость силы трения покоя от времени неподвижного контакта. Действительно, если удельную силу трения выразить в виде дроблена

$$\tau = \alpha_1 + \beta_1 q, \quad (3)$$

где  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  — константы, характеризующие взаимодействие физических поверхностей твердых тел,  $q$  — удельное давление на контакте, то учитывая (1) и (2), получим:

$$T = \alpha \cdot A_a^{\frac{m}{\nu+m}} b^{\frac{m}{\nu+m}} \left( \frac{\nu+m}{B} \right)^{\frac{\nu}{\nu+m}} (1 - e^{-\beta t^p})^\nu N^{\frac{\nu}{\nu+m}} + \beta_1 (1 - e^{-\beta t^p})^{\nu+m} \cdot N \quad (4)$$

Для случая сухого трения формула (4) может быть упрощена, т. к. в биномиальной зависимости (3) второй член для мягких материалов составляет малую величину (значение  $\beta$  для них порядка 0,01—0,02). Исходя из этого:

$$T = \alpha \cdot A_a^{\frac{m}{\nu+m}} b^{\frac{m}{\nu+m}} \left( \frac{\nu+m}{B} \right)^{\frac{\nu}{\nu+m}} (1 - e^{-\beta t^p})^\nu N^{\frac{\nu}{\nu+m}}. \quad (5)$$

Как показано в [3], на «скачки» больше влияет вид кривых зависимостей силы трения покоя от времени неподвижного контакта, чем их абсолютные значения. Исходя из этого, функцию рассмотрим в зависимости от переменной  $t$ , принимая остальные параметры постоянными:

$$T = T^* (1 - e^{-\beta t^p}). \quad (6)$$

Функция (5) имеет асимптоту  $T^*$ , уравнение которой имеет вид:

$$T^* = \alpha \cdot A_a^{\frac{m}{\nu+m}} b^{\frac{m}{\nu+m}} \left( \frac{\nu+m}{B} \right)^{\frac{\nu}{\nu+m}} N^{\frac{\nu}{\nu+m}}. \quad (7)$$

Одну и ту же асимптоту может иметь бесчисленное множество кривых (рис. 1), если в их уравнении (6) изменить параметры  $\delta$  и  $\rho$ . Легко убедиться в том, что при больших значениях  $\delta$  и  $\rho$  функция (6) быстро возрастает (кривая 1), т. е. реологические свойства фрикционного материала сильно влияют на рост трения покоя от продолжительности неподвижного контакта. И наоборот: при малых значениях функция возрастает медленно и имеет пологий вид (кривая 3), следовательно, влияние реологических свойств меньше.

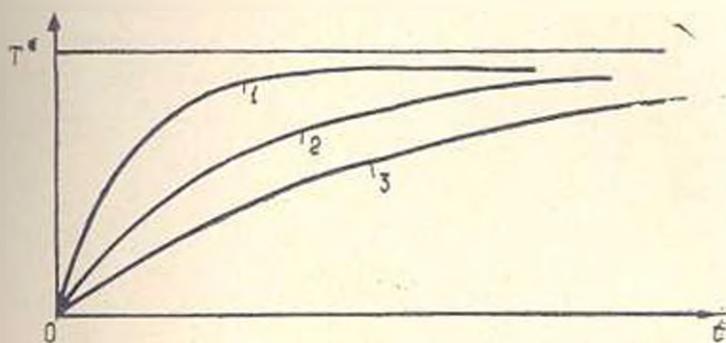


Рис. 1. Зависимость силы трения покоя от продолжительности неподвижного контакта.

Для использования формулы (6) нами предлагается достаточно простой экспериментальный метод определения реологических констант  $\delta$  и  $\rho$ .

Поскольку выявлено [1, 2], что форма внедряемого индентора практически не влияет на величину констант  $\delta$  и  $\rho$ , то и наиболее рациональной формой индентора при вычислениях реологических констант является сферическая (рис. 2), т. к. она упрощает использование распространенных приборов (прессе Бринеля) для определения реологических свойств материалов.

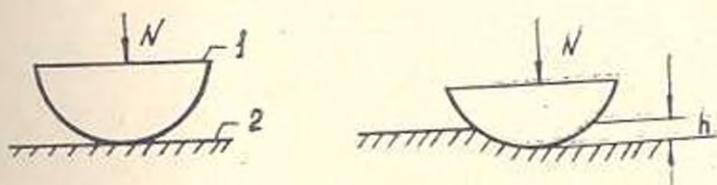


Рис. 2. Схема погружения индентора: 1—индентор; 2—материал.

В результате регистрации процесса погружения индентора в материал получаем кривую зависимости глубины внедрения  $h$  от времени неподвижного контакта  $t$  (рис. 3).

Весьма отчетливо можно установить ту асимптоту, которая ограничивает глубину внедрения — это величина принимается за глубину при бесконечно большом значении времени контакта —  $h_{\infty}$ . Затем на кривой выбирают две точки (например,  $a$  и  $b$ ) с координатами соответственно:  $h_a, t_a; h_b, t_b$ .

Кривая погружения описывается формулой:

$$h = h_{\infty} (1 - e^{-\lambda t^p}). \quad (8)$$

Имея

$$\begin{cases} h_1 = h_{\infty} (1 - e^{-\lambda t_1^p}), \\ h_2 = h_{\infty} (1 - e^{-\lambda t_2^p}), \end{cases} \quad (9)$$

и решив эту систему, можно определить обе реологические константы.

Для этого необходимо сделать не менее 20 измерений для каждого материала, при 2—3 различных нагрузках, и для каждого определить свои  $\delta$  и  $p$ , а затем сравнить их.

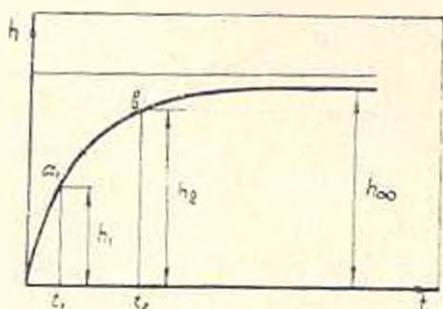


Рис.-3. Зависимость глубины внедрения от времени неподвижного контакта.

Таким образом, выбор пар трения, обеспечивающих плавность перемещения, обусловлен не только их фрикционными характеристиками, но и реологическими свойствами, что должно быть учтено при выборе того или иного материала. А реологические константы можно определить по предложенной методике.

Երևանի Կ. Մարյան

Получено 14 XII. 1978

Չ. Ա. ՄԱԿԻՅԱՆ

ՇՓԱԿԱՆ ԿՅՈՒԹԵՐԻ ԻՆՈՒՍԻՏՈՒԿԱՆ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆՆԵՐԻ  
ԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆԵՐ ԶԱՏԿԱԶՆԵՎ ՇԱՐՔԻՄԱՆ ՎԵՐ ԽՎ ԿՐԱՆՑ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ո ս Վ

Ցույց է տրված, որ կայուն տեղաշարժ աղաճավող շփման դույզի բնութագրեր պայմանավորված է ոչ միայն շփական հատկություններով, այլև կյուբի սեղողիական հաստատուն գործակիցներով:

Ելնելով դադարի շփման ուժի և իրական հսկման մակերեսի կապից, առաջարկված է ռեոլոգիական գործակիցների որոշման փորձնական նշանակ, որոնք կարևոր են շփման ժամանակ ցատկաձև շարժումը վերացնող ելուժների ընտրության համար:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Крашотский И. В. Трение и износ. М., «Машиностроение», 1968.
2. Костерин Ю. И. Механические автоколебания при сухом трении. М., Изд. АН СССР, 1960.
3. Минвелян Э. А. Оценка устойчивости медленных перемещений в прижимающих станках с ЧПУ с применением ЭВМ. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXX, № 6, 1977.
4. Лютцау В. Г. Исследование релаксации напряжений в металлах при комнатной температуре методами измерения поперечной деформации и рентгеноанализа. Автореферат канд. диссерт., М., 1957.
5. Равинский Б. М. К вопросу о механизме релаксации напряжений в металлах. «Известия АН СССР, ОТН», № 2, 1957.

Д. Б. ДАВИДЯН, И. А. ДОМБЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ МАЛОНАПРЯЖЕННОСТИ  
 В СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ МЕТАЛЛОВ  
 С ЭПОКСИДНЫМ КОМПАУНДОМ

Известно, что при изменении формы соединения двух разнородных материалов изменяется вид напряженного состояния (малонапряженность или концентрация напряжений) в окрестности края поверхности соединения при произвольном нагружении или же при изменении температуры [1]. Оптимальная геометрическая форма края соединения повышает механическую выносливость и коррозионную стойкость стыка разнородных материалов.

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния вида напряженного состояния в стыковом цилиндрическом соединении металлов с эпоксидным компаундом на прочность и характер разрушения при равномерном отрыве. Полученные данные сопоставляются с результатами расчетов вида напряженного состояния на крае соединения для случая плоского напряженного состояния.

В окрестности края поверхности контакта все компоненты напряжения имеют вид

$$\sigma = r^{\lambda-1} \Psi(r, \varphi),$$

где  $\Psi(r, \varphi)$  — ограниченная и вообще не стремящаяся к нулю при  $r \rightarrow 0$  функция;  $r, \varphi$  — полярные координаты края поверхности контакта;  $\lambda$  — действительная часть корня  $\lambda$  трансцендентного уравнения

Вид напряженного состояния около края поверхности контакта определяется величиной наименьшей действительной части корня  $\lambda$  трансцендентного уравнения

$$\begin{aligned} f^*(\lambda) = & (\mu - 1)^2 (\sin^2 \alpha - \lambda^2 \sin^2 \alpha) (\sin^2 \beta - \lambda^2 \sin^2 \beta) + \\ & + 4\mu m_1 m_2 |\sin^2(\alpha + \beta) \lambda - \lambda^2 \sin^2(\alpha + \beta)| - \\ & - 4(\mu - 1) [\mu m_2 (\sin^2 \alpha - \lambda^2 \sin^2 \alpha) \sin^2 \beta - m_1 (\sin^2 \beta - \lambda^2 \sin^2 \beta) \sin^2 \alpha] + \\ & + 4(\mu m_2 - m_1) [\mu m_2 (\sin^2 \alpha - \lambda^2 \sin^2 \alpha) - m_1 (\sin^2 \beta - \lambda^2 \sin^2 \beta)] = 0, \end{aligned}$$

где  $\mu = \frac{G_1}{G_2}$ ;  $G_1$  и  $G_2$  — модули сдвига;  $m_1 = \frac{1}{1 + \nu_1}$ ;  $m_2 = \frac{1}{1 - \nu_2}$

$\nu_1$  и  $\nu_2$  — коэффициенты Пуассона. Индекс „1“ относится к более деформативному материалу и к нему же относится угол  $\alpha$ .

Если  $\xi > 1$ , в малой окрестности краевой точки поверхности контакта будет нулевое напряженное состояние. При  $\xi < \text{около края}$  имеет место сильная концентрация напряжений, а при  $\xi = 1$  напряжения будут конечными и отличными от нуля.

Расчеты проводились на ЭВМ „Раздан-3“ для случая  $\alpha + \beta = \pi$  для следующих компоновок материалов: Д1 ( $E = 77 \text{ ГПа}$ ,  $\nu = 0,28$ ) — Эг (смола эпоксидная ЭД-5—100 масс.ч, ДБФ—10 масс.ч, ПЭПА—10 масс.ч, полимеризация при  $75^\circ\text{C}$  в течение 8 час,  $E = 4,2 \text{ ГПа}$ ,  $\nu = 0,4$ ,  $[\sigma] = 50 \text{ МПа}$ ); СтЗ—Э (смола эпоксидная ЭД-5—100 масс.ч, ДБФ—10 масс.ч, ПЭПА—10 масс.ч, полимеризация при комнатной температуре,  $E = 2,7 \text{ ГПа}$ ,  $\nu = 0,416$ ,  $[\sigma] = 32,4 \text{ МПа}$ ); Э—Эг. Результаты расчетов  $\lambda$  представлены в виде графиков на рис. 1 и 2.

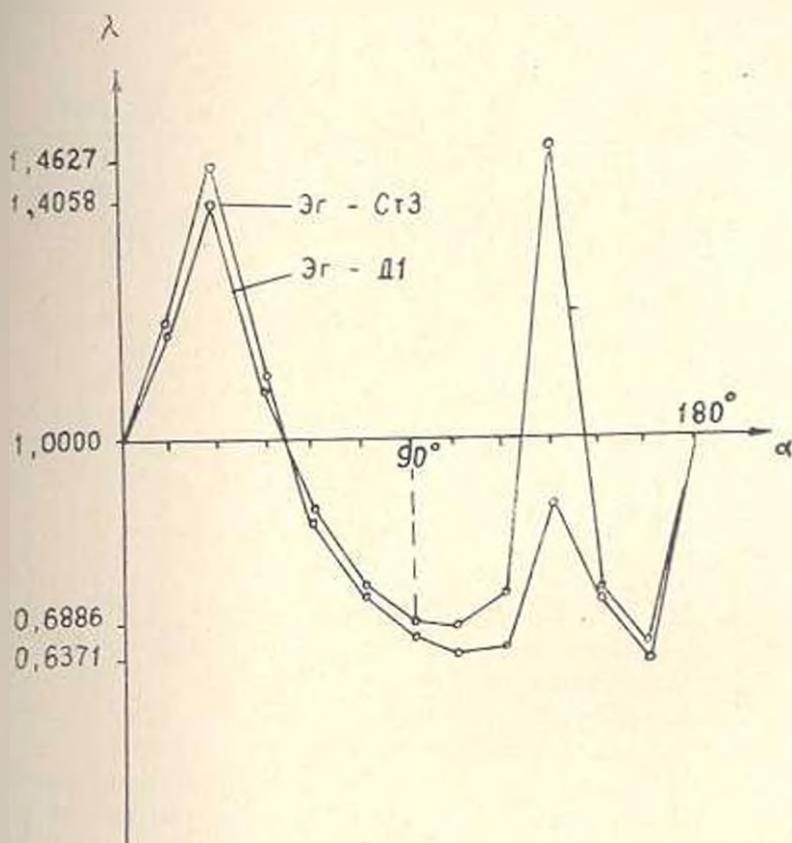


Рис. 1.

Переход из малонапряженного в концентрационное напряженное состояние происходит для исследованных соединений при близких значениях предельного угла, равного  $\alpha \approx 52^\circ$ . Этот угол определяется значением коэффициента поперечной деформации слабого компонента при

большой разнице в модулях упругости. Угол перехода для исследованных соединений всегда меньше  $\frac{\pi}{2}$  поэтому в прямом соединении исследованные композиции имеют сильную концентрацию напряжений на крае соединения.

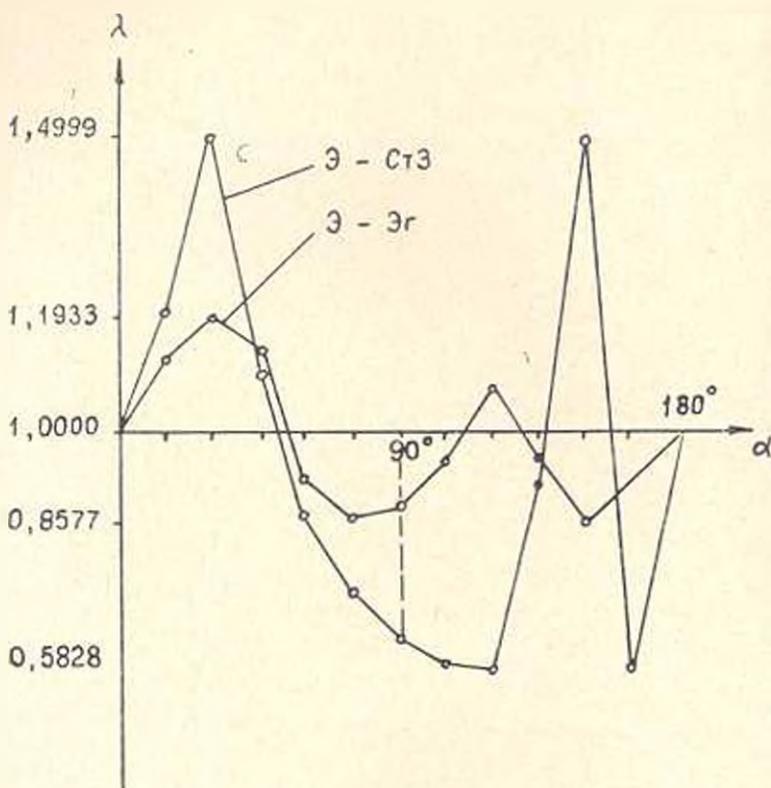


Рис. 2.

Результаты экспериментальной проверки для соединения СтЗ—Э приводятся в табл. 1. Эксперименты проводились по методике [2].

В соединении с малонапряженным краем ( $\alpha = 37^{\circ}30'$ ) прочность значительно увеличилась по сравнению с прочностью соединений с концентратором напряжений на крае ( $\alpha = 90^{\circ}$ ,  $\alpha = 142^{\circ}30'$ ), что подтверждает предположения о существенном влиянии на адгезионную прочность вида напряженного состояния на крае соединения [3] и характера его разрушения. Для малонапряженного соединения характер разрушения был когезионным, с частичным выходом в адгезионный в центре соединения. При этом наблюдалось значительное последствие ударной волны: оно выражалось в отслоении кольцеобразного участка компаунда. Подобное расслоение не наблюдалось для образцов с минимальной прочностью. Для соединения типа II характер разрушения был смешанным: частично адгезионным и частично когезионным по адгезиву.

Для соединения типа III характер разрушения был вначале адгезионным, а затем когезионным.

Таблица 1

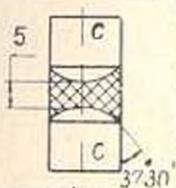
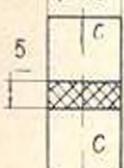
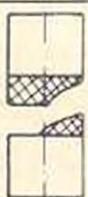
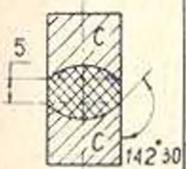
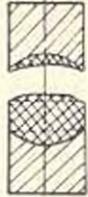
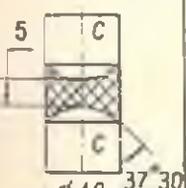
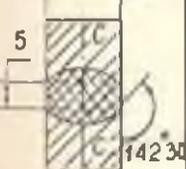
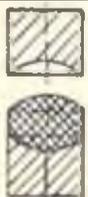
№	Тип соединения	$\sigma$ МПа	$\frac{\sigma}{\sigma_2}$ 100%	Характер разрушения
1		15,1	176	
2		8,6	100	
3		5,6	65	

Таблица 2

№	Тип соединения	$\sigma$ МПа	$\frac{\sigma}{\sigma_2}$ 100%	Характер разрушения
1		27,1	560	Тип I Тип II Тип III
2		4,8	100	

В табл. 2 приведены результаты экспериментов с соединениями Ст3—Эг. Для малонапряженного состояния получено значительное уве-

личение прочности при когезионном характере разрушения трех типов (рис. 3). Тип I — наиболее прочен, поверхность разрушения шероховатая; тип II — подобен типу I, но менее прочен и поверхность разрушения гладкая; тип III — получен в результате растяжения с изгибом. Соединения с концентрационным напряженным состоянием характеризуются чистым адгезионным расслоением.

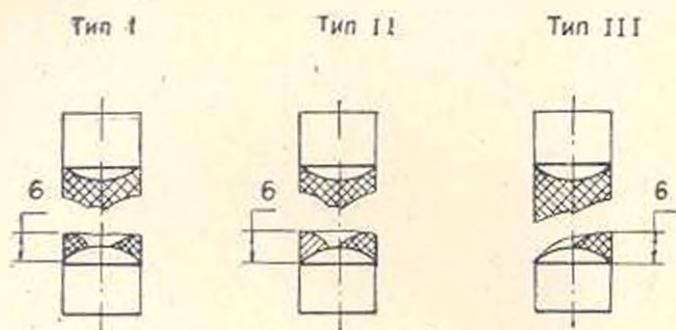


Рис. 3.

В следующем эксперименте выявлялось влияние формы кромок на прочность и характер разрушения в цилиндрических соединениях Д1—Эг в диапазоне углов от  $\alpha = 20^\circ$  до  $\alpha = 150^\circ$ . Для снижения влияния концентратора напряжений во внутренней области пересечения поверхностей последняя скруглялась с радиусом  $R = 1$  мм. Для каждого угла испытывалось по 6 образцов. Для сравнения были склеены образцы с тонкой клеевой прослойкой в 0,2 мм без разделки кромок, со скруглением и образцы с канавками для получения малонагруженного с края соединения.

Эксперимент проводился одновременно для всех углов и сравниваемых соединений на одном и том же компаунде. Результаты представлены на рис. 4. Для выбранной формы кромки прочность и характер разрушения соответствуют результатам экспериментов, представленным в табл. 1 и 2.

Выявилось смещение предельного угла в сторону малонапряженной области приблизительно на  $10^\circ$  по сравнению с рассчитанным, из условия идеальности геометрических форм, однородности, изотропности и упругости материалов. Это смещение связано еще и с тем, что в формуле учитываются не все факторы, влияющие на предельный угол. Одним из таких факторов могут быть остаточные напряжения, возникающие после горячей полимеризации компаунда. Вероятно, по этой же причине не выявлена в эксперименте вторая узкая область малонапряженности между углами  $90^\circ$  и  $180^\circ$ .

Прочность малонапряженного соединения с толстой клеевой прослойкой оказалась близкой к прочности прямого соединения с тонкой клеевой прослойкой без разделки кромок. Для прямого соединения ( $\alpha = 90^\circ$ ) с толстой клеевой прослойкой прочность снижена: для же-

стких клеев это снижение значительнее, чем для клеев с большей долей высокоэластических деформаций. Влияние толщины клеевой прослойки на прочность зависит от вида напряженного состояния на крае соединения. Эта зависимость, обнаруженная при сдвиге [4], распространяется и на случай малонапряженности на крае соединения при испытаниях на равномерный отрыв.

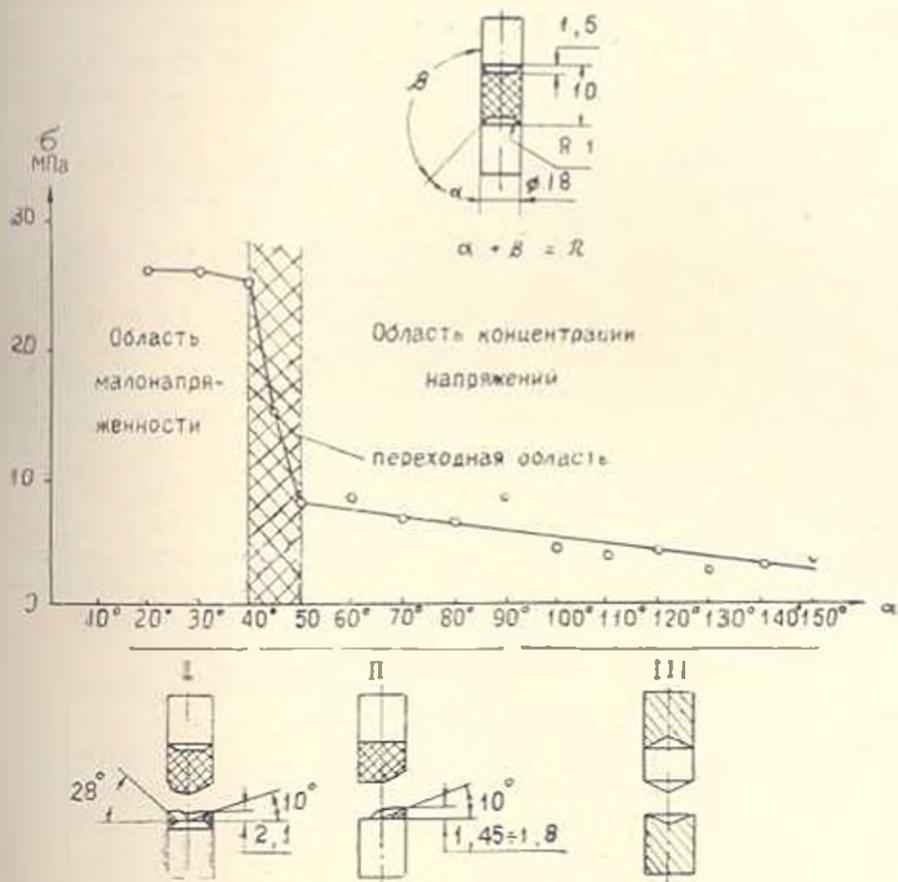


Рис. 4.

Таким образом, при равенстве или небольшой разности адгезионной и когезионной прочности адгезивов в толстых слоях малонапряженному состоянию на крае соединения соответствует высокая прочность и когезионное разрушение, а концентрационному напряженному состоянию — малая прочность и адгезионный характер разрушения.

«ՄԵՏԱՂ-ԷՊՈՔՍԻԳԱՅԻՆ, ԿՈՐՊՈՐԱՆԻԿ» ԵՎՅՐԱԿՅՎԱՆ ՄԻԱՑՄԱՆ ՄԵՉ  
ԹԵՐԱՐՎԱՌՈՒԹՅԱՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ու ռ

Գիտարկվում է մետաղ-էպօքսիդային միացման հաժախարաչափ պոկման փորձի ղեկավարում նրա մակերևույթի եզրի յարվածային վիճակի (Յերյարվածային կամ կոնցենտրացված) սղղեցությունը միացման ամրության և քայքայման բնույթի վրա:

Յերյարվածային վիճակին համապատասխանում է բարձր ամրություն և կոդեզային, իսկ կոնցենտրացված վիճակին՝ ցածր ամրություն և աղղեզային բնույթի քայքայում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Чобакян К. С. Явление малонапряженности края поверхности контакта нагруженного тела. Открытие № 102 «Открытия. Изобр. Пром. образцы. Товарн. знаки», 1971, № 36.
2. Патурова В. В. Испытания синтетических клеев. М., «Лесная промышленность», 1969.
3. Бикерман Я. О. «Успехи химии», Т. 42, № 1431, 1972.
4. Фрейдли А. С., Малицкий Ю. М., Ву Би Кием. О факторах, влияющих на масштабный эффект в клеевых соединениях ВНИИТИ, № 1241—69. Дел.

## ЭНЕРГЕТИКА

Լ. Ա. ՄՈՒՅԱՆ

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТА  
ГАЗА С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

В статье [1] рассмотрен подход синтеза оптимальных газотранспортных систем, основанный на предварительной подготовке и использовании в модели вариантов усиления, действующих в строительстве новых газопроходных участков и компрессорных станций. В результате решения задачи оптимизации по каждому газопроводному участку и компрессорной станции определяются те варианты, при которых суммарные затраты по системе минимальны и обеспечиваются заданные потребности в газе с выполнением технологических условий. Поскольку оперирование производится с заранее отобранными вариантами элементов системы, то для них предварительно могут быть оценены и такие показатели, как, например, металлозатраты, число используемых агрегатов, коэффициенты готовности вариантов, стационарные вероятности их пребывания в ремонте [2] и др. Имея такие показатели по вариантам элементов системы, нетрудно формировать и включать в целевую функцию или ограничения задачи оптимизации условия, отражающие соответствующие показатели по всей системе.

Ниже рассматривается расширенная вариантная модель оптимизации с теми дополнительными условиями, которые позволяют осуществить синтез оптимальной газотранспортной системы с учетом надежности ее функционирования, что оценивается по ожидаемым средним состояниям элементов системы. В основу такого рассмотрения положено условие, что математическое ожидание функции нескольких случайных переменных приближенно равно той же функции от математических ожиданий ее аргументов [2].

Пусть так же, как и ранее [1], по каждому элементу  $(i, j)$  газотранспортной системы выбраны  $n_{ij}$  вариантов его усиления или строительства. Обозначим приведенные затраты  $k$ -го варианта по газопроводному участку  $(i, j)$  через  $C_{ij}^{vk}$ , а по компрессорной станции  $(i, j)$  —  $C_{ij}^{kc}$ , где  $k = \overline{1, n_{ij}}$ ;  $d_{ijk}$  — эквивалентный диаметр  $k$ -го варианта по газопроводному участку  $(i, j)$ ;  $a_{ijk}$ ,  $b_{ijk}$  — коэффициенты А. Г. Немудрова [2] для  $k$ -го варианта компрессорной станции  $(i, j)$ . Эквивалентный диаметр действующего участка  $(i, j)$  обозначим через  $d_{ij}^*$ , а коэф-

фиценты для действующей станции  $(i, j) - \bar{a}_{ij}, \bar{b}_{ij}$ . Средние значения рассмотренных параметров с учетом отказов и восстановлений в планируемом году, рассчитанные с помощью показателей удельной интенсивности аварий  $\lambda$  и среднего времени ремонтно-восстановительных работ  $T_{ep}$  [2], обозначим теми же буквами с черточкой сверху —  $\bar{a}_{ij}, \bar{a}_{ijk}, \bar{b}_{ij}, \bar{b}_{ijk}$ . Тогда развернутая модель задачи оптимизации с учетом надежности функционирования можно представить следующей задачей нелинейного математического программирования с частично-булевыми переменными: найти минимум суммарных приведенных затрат на систему

$$\sum_{(i, j) \in T_{г.у}} \sum_{k=1}^{n_{ij}} C_{ijk}^* \cdot X_{ijk} + \sum_{(i, j) \in T_{в.с}} C_{ijв}^* \cdot Y_{ijв} + 365 \cdot \sum_{i \in I_n} \bar{r}_i (Q_{in} - Q_{inф}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где первое слагаемое отражает суммарные приведенные затраты по газопроводным участкам, второе — по компрессорным станциям и третье — на замещающий вид топлива по потребителям.

Ограничения задачи оптимизации таковы:

$$\sum_{j \in X_{г.у}} X_{ij} \cdot \operatorname{sgn}(P_i - P_j) \cdot Q_{jг} + \sum_{j \in X_{в.с}} Y_{ij} \cdot \operatorname{sgn}(P_i - P_j) \cdot Q_{jв} = \begin{cases} Q_{in}, & \text{если } i \in I_n; \\ 0, & \text{если } i \in I_u; \\ Q_{in}, & \text{если } i \in I_u; \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_{ij} \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^{n_{ij}} X_{ijk}\right) = 0; \quad (3)$$

$$|P_i^2 - P_j^2| = C_{ij} \cdot Q_{ij}^2 (d_{ij}^* + d_{ijk} \cdot X_{ijk})^{5,2}, \quad (i, j) \in T_{г.у}; \quad (4)$$

$$(P_i - P_j) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^{n_{ij}} Y_{ijk}\right) = 0; \quad (5)$$

$$\sqrt{(a_{ij}^* \cdot \min(P_i^2, P_j^2) - \max(P_i^2, P_j^2)) / d_{ij}^*} + Y_{ijk} \cdot \sqrt{(a_{ijk} \cdot \min(P_i^2, P_j^2) - \max(P_i^2, P_j^2)) / b_{ijk}} = Q_{ij}, \quad (i, j) \in T_{в.с}; \quad (6)$$

$$\sum_{j \in X_{г.у}} X_{ij} \cdot \operatorname{sgn}(P_{iф} - P_{jф}) \cdot Q_{jф} + \sum_{j \in X_{в.с}} Y_{ij} \cdot \operatorname{sgn}(P_{iв} - P_{jв}) \cdot Q_{jв} = \begin{cases} Q_{inф}, & \text{если } i \in I_n; \\ 0, & \text{если } i \in I_u; \\ Q_{inф}, & \text{если } i \in I_u; \end{cases} \quad (7)$$

$$Q_{\text{инф}} \geq Q_{\text{ин}}; \quad (8)$$

$$Q_{i,j\phi} \left( 1 - \sum_{k=1}^{n_{ij}} X_{ijk} \right) = 0; \quad (9)$$

$$|P_{i\phi}^1 - P_{j\phi}^2| = c_{ij} \cdot Q_{i,j\phi}^2 (\bar{d}_{ij}^2 + \bar{d}_{ijk} \cdot X_{ijk})^{0.5}; \quad (i, j) \in T_{12}; \quad (10)$$

$$(P_{i\phi} - P_{j\phi}) \cdot \left( 1 - \sum_{k=1}^{n_{ij}} Y_{ijk} \right) = 0; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{(a_{ij}^* \cdot \min(P_{i\phi}^1, P_{i\phi}^2) - \max(P_{j\phi}^1, P_{j\phi}^2)) / \delta_{ij}^* +} \\ & + Y_{ijk} \cdot \sqrt{(a_{ijk}^* \cdot \min(P_{i\phi}^1, P_{j\phi}^2) - \max(P_{i\phi}^2, P_{j\phi}^1)) / b_{ijk}} = Q_{i,j\phi}, \quad (12) \\ & (i, j) \in T_{12}; \end{aligned}$$

$$X_{ijk} = \{0; 1\}; \quad Y_{ijk} = \{0; 1\}. \quad (13)$$

Здесь приняты следующие обозначения (переменные с индексами  $\phi$  отражают режим работы системы с учетом отказов и восстановлений, а переменные без них — безотказный режим работы системы):

$c_{ij}$  — функция затрат на замещающий вид топлива в  $i$ -ом пункте потребления газа с учетом отказов и восстановлений системы;  $Q_{\text{ин}}$  — среднесуточная фиксированная потребность в газе  $i$ -го потребителя с учетом коэффициента неравномерности газопотребления;  $Q_{\text{инф}}$  — минимально-допустимый суточный поток газа  $i$ -му потребителю, обусловленный технологическими условиями ее функционирования;  $Q_{i,j\phi}$  — фактически ожидаемый поток газа  $i$ -му потребителю с учетом отказов и восстановлений системы;  $P_i, P_j, P_{i\phi}, P_{j\phi}$  — давление газа в узлах  $i$  и  $j$  системы;  $Q_{ij}, Q_{i,j\phi}$  — потоки газа через элемент  $i, j$  системы;  $Q_{i\phi}, Q_{i,\text{инф}}$  — отборы газа из  $i$ -го источника системы;  $c_{ij}$  — коэффициент;  $T_{12}, T_{\text{кв}}, I_{\text{п}}, I_{\text{и}}$  и  $I_{\text{н}}$  — соответственно, множества газопроводных участков, компрессорных станций, потребителей, источников и нейтральных узлов системы, в которых отсутствуют как потребители, так и источники;  $X_{\text{кв}}, X_{\text{инф}}$  — множества газопроводных участков и компрессорных станций, смежных к  $i$ -му узлу.

При наличии элемента между узлами  $i$  и  $j$   $X_{ij} = Y_{ij} = 1$ .

Для новых элементов  $X_{ij} = X_{i,\text{ин}}$  и  $Y_{ij} = Y_{i,\text{ин}}$ :

$$\begin{aligned} \text{sgn}(P_i - P_j) &= \{0, \text{ когда } P_i = P_j; 1, \text{ когда } P_i > P_j; \\ &-1, \text{ когда } P_i < P_j\}. \end{aligned}$$

Условия (2) — (6) отражают технологические связи между режимными переменными системы при условии ее безотказного функционирования, а (7) — (13) — те же связи с учетом отказов и восстановлений



элементов сети. При этом условия (2), (7) отражают баланс газа в узлах системы; условия (3), (4) и (8), (9) относятся к газопроводным участкам, (5, 6) и (11), (12) — компрессорным станциям. Причем, условия (3), (9) и (5), (11) записываются только для тех новых газопроводных участков и компрессорных станций, по которым можно не принимать какие-либо решения (для них ставятся условия:  $\sum X_{ijk} < 1$ ;  $\sum Y_{ijk} < 1$ ). Если же по новому элементу (i, j) обязательно нужно выбрать новое техническое решение, то ставятся условия  $\sum X_{ijk} = 1$ ;  $\sum Y_{ijk} = 1$ .

Кроме описанных условий на переменные  $P_i, P_{ij}, P_j, P_{jk}, P_{ij}, Q_{ijk}$  (может быть и на  $Q_{in}, Q_{ijk}$ ) ставятся непосредственные условия типа „не более чем“ и (или) „не менее чем“.

Как видно, учет надежности функционирования при данном подходе приводит к рассмотрению дополнительных условий и удвоению количества непрерывных режимных переменных, что несколько усложняет реализацию модели. Число же структурных (булевых) переменных при этом не изменяется. Как и ранее [1], реализация модели осуществляется разработанными методами частично-дискретного математического программирования или же методами полностью непрерывного математического программирования, если использовать эквивалентные условия по булевым переменным (например,  $X_{ijk}^2 - X_{ijk} = 0$  и  $Y_{ijk}^2 - Y_{ijk} = 0$ ).

*Расчетный пример.* Рассмотренная выше модель апробирована на примере газотранспортной сети, представленной на рисунке, где компрессорные станции (1, 2), (15, 7), (8, 10) обозначены прямоугольниками, а газопроводные участки (2, 3), (3, 4), (3, 6), (4, 5), (6, 5), (5, 8), (6, 9), (8, 9), (10, 11), (11, 12), (11, 13), (11, 14) — отрезками прямых, причем, сплошными линиями обозначены уже действующие элементы, а пунктирными — новые. Параметры действующих газопроводных участков указаны на рисунке. На компрессорных станциях (1, 2) и (15, 7) установлены по четыре центробежных компрессора типа 280, работающих по схеме одноступенчатого сжатия в параллельных группах. Система предназначена для снабжения газом потребителей, расположенных в узлах 4, 6, 9, 12, 13, 14 (они указаны на рис. стрелками) потребности которых, соответственно, равны: 23, 9; 2; 5, 86; 2, 97; 16, 66 и 4, 3 млн. м<sup>3</sup>/сутки газа. Газ в систему поступает из двух источников — 1 и 15 — с давлениями, соответственно, в 43, 8 и 42 ата.

С целью обеспечения потребителей необходимыми объемами топлива рассматриваются следующие варианты усиления элементов газотранспортной системы:

усиление компрессорной станции (15, 7) дополнительно одной, двумя и тремя линиями одноступенчатого сжатия с аналогичными агрегатами типа 280;

строительство новой станции (8, 10) с двумя, тремя и четырьмя параллельно работающими агрегатами типа 280 по схеме одноступенчатого сжатия;

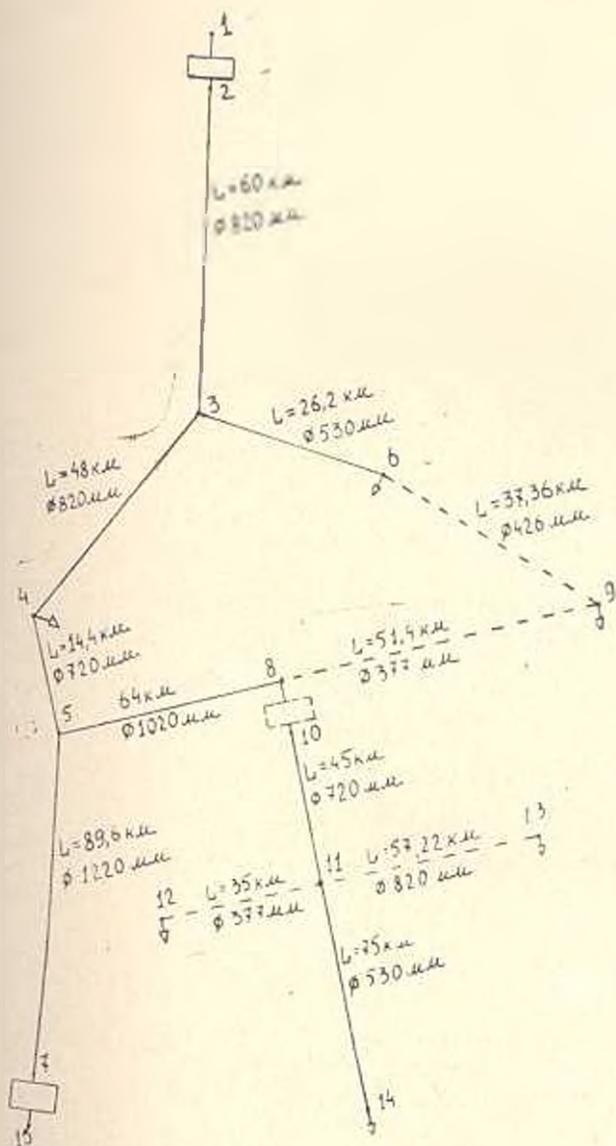


Рис.

строительство новых газопроводных участков (6, 9), (8, 9), (11, 12) и (11, 13), по которым рассматриваются по шесть вариантов проведения ниток с диаметрами 377, 426, 530, 720, 820 и 1020 мм.

По компрессорной станции (1, 2) и остальным газопроводным участкам варианты по их усилению не предусматривались.

Математическая модель рассматриваемой задачи оптимизации включает 30 булевых и 50 непрерывных переменных. Ее решение осу-

шествлено по программе, реализующей двухэтапную релаксационную процедуру поиска минимума по булевым и непрерывным переменным [3]. Однако, в отличие от [3] этап поиска минимума по непрерывным переменным был осуществлен по методу покоординатного поиска.

В результате решения задачи оптимизации получены величины потоков и давлений газа, отражающие безотказный и фактический режимы работы системы, а также необходимые суточные потоки замещающего вида топлива потребителям. В качестве замещающего вида топлива рассматривался уголь.

Полученные технические решения по новым газопроводным участкам указаны на рис. По компрессорной станции (15, 7) получено, что необходимо добавить два агрегата, которые с установленными четырьмя агрегатами образуют шесть параллельных групп одноступенчатого сжатия. Компрессорную станцию (8, 10) необходимо оснастить четырьмя агрегатами.

ВНИИЭгазпром

Поступило 2 VII 1980

## 1. 2 ՀՈՒՆԱՆԱՆ

### ԳԱՋԻ ՓՈՒԿԱԳՐՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԿ ՀԱՄԱԿԱՐԿԵՐԻ ԸՆՏՐՄԱՆ ՄԱՍԻՆ՝ ՀԱՇՎԻ ԱՌՆԵԼՈՎ ԵՐԱՆՑ ԴՈՐԾՆԵՌԻՔՅԱՆ ՀՈՒՍԱՎՈՒԹՅՈՒՆԸ

#### Ա մ փ ո փ ո ս մ

*Գիտարկվում է գազի փոխադրման համակարգերի դարգացման օպտիմալացման տարրերակալին մոդել նրանց ղործունեության հուսալիությունը արտացոլող պայմաններով: Բերվում են հաշվարկային օրինակի արդյունքները:*

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Уманян Л. А. Выбор оптимальных систем транспорта газа. Реф. сб. «Транспорт и хранение газа», № 12, 1979, М., ВНИИЭгазпром
2. Александров А. В., Яковлев Е. И. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта газа. М., «Недра», 1974.
3. Лиониз В. И. Об одной задаче невыпуклого программирования. «Тр. 2-й лимб. шк. по мат. программы и смежн. попр.», Вып. III, М., ЦЭМИ АН СССР, 1969.

ГИДРОТЕХНИКА

Э. А. ХАЧАТРИАН

РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОГО ВОДОЗАБОРА ПОДЗЕМНЫХ ВОД  
 В ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО  
 ПИТАНИЯ

Анализ наблюдений за режимом подземных вод показывает, что во многих районах на орошаемых территориях уровень грунтовых вод в покровных отложениях залегает на небольшой глубине. Для уменьшения бесполезных потерь воды на испарение необходимо уровень грунтовых вод снизить на определенную глубину [1].

При работе подземных водозаборных сооружений, т. е. при понижении уровня грунтовых вод (увеличении зоны аэрации) доля атмосферных осадков, идущая на испарение и транспирацию, уменьшается, за счет чего увеличивается инфильтрационное питание. Таким образом, можно в значительной степени увеличить эффективность использования грунтовых вод на орошение.

Решение поставленной задачи (при работе линейно расположенных скважин в двухслойной фильтрационной среде — рис. 1) можно реализовать при помощи следующих дифференциальных уравнений [2-4]:

$$\frac{k_0}{m_0} (S - S_0) - \alpha S_0 = \mu_0 \frac{\partial S_0}{\partial t}; \quad (1)$$

$$a \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - \frac{k_0}{\mu m_0} (S - S_0) = \frac{\partial S}{\partial t}. \quad (2)$$

В этих уравнениях в качестве гипотезы принято, что инфильтрационное питание поверхностных вод изменяется линейно в зависимости от понижения уровня грунтовых вод.

Начальные и граничные условия формулируются следующим образом:

$$t = 0, \quad S(x, 0) = S_0(x, 0) = 0; \quad (3)$$

$$t > 0, \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\partial S}{\partial x} \Big|_{x=0} = - \frac{q_0}{2km}; \quad (4)$$

$$x \rightarrow \infty, \quad S(x, t) = S_0(\infty, t) = 0, \quad (5)$$

где  $S_0$ ,  $S$  — понижения уровней, м;  $km$ ,  $a$  — коэффициенты водопроницаемости и пьезопроводности,  $\text{м}^2/\text{сут}$ ;  $q_0$  — дебит скважины на 1 п. м,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;  $q_0 = \frac{Q}{a}$ ;  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности,  $1/\text{сут}$ ;  $m$ ,  $m_0 = H - S_0$  — средняя мощность безнапорного горизонта, м.

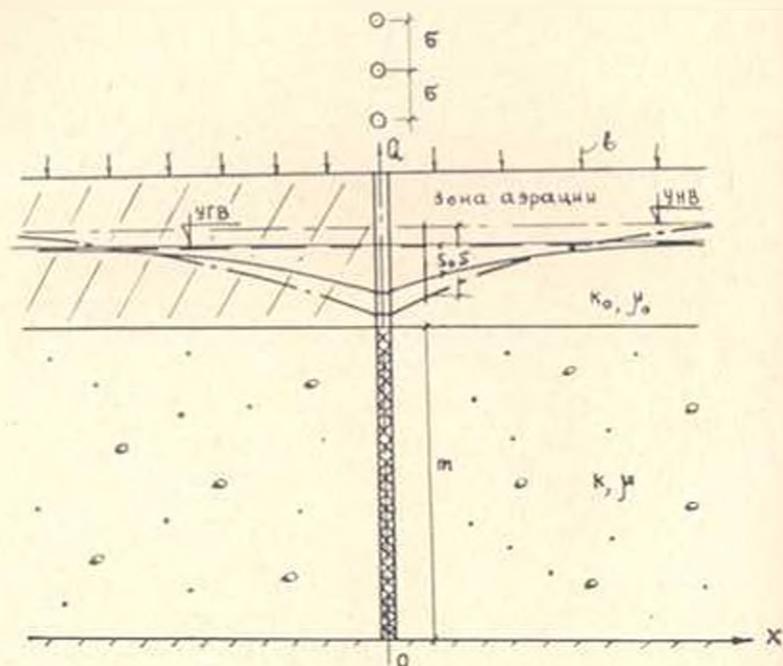


Рис. 1.

Из уравнения (1) можно получить:

$$S = \beta S_0 + \gamma \frac{\partial S_0}{\partial t}, \quad (6)$$

где

$$\beta = 1 + \frac{\alpha m_0}{k_0}; \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{\nu_0 m_0}{k_0}. \quad (8)$$

Подставляя выражение (6) в уравнение (2), получаем:

$$a \left[ \left( \beta \frac{\partial^2 S_0}{\partial x^2} + \gamma \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 S_0}{\partial x^2} \right) \right) - \frac{k_0}{\mu m_0} \left( \beta S_0 + \gamma \frac{\partial S_0}{\partial t} - S_0 \right) \right] = \beta \frac{\partial S_0}{\partial t} \quad (9)$$

или

$$a \left[ \beta \frac{\partial^2 S_0}{\partial x^2} + \gamma \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 S_0}{\partial x^2} \right) \right] - \frac{a}{\mu} S_0 = \left( \beta + \frac{\nu_0}{\mu} \right) \frac{\partial S_0}{\partial t}. \quad (10)$$

В уравнения (9), (10) опущена вторая производная по времени  $\frac{\partial S}{\partial t^2}$  ввиду ее малости по сравнению с первой производной  $\frac{\partial S}{\partial t}$ .

Граничное условие (4) с учетом (6) представляется в следующем виде:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial x} \left( S_0 \beta + \gamma \frac{\partial S_0}{\partial t} \right) = - \frac{q_0}{2km} \quad (11)$$

Применяя интегральное преобразование Лапласа по переменной  $t$  к уравнению (10), получаем:

$$\frac{d^2 u_0}{dx^2} - u_0 \theta = 0, \quad (12)$$

где

$$u_0 = \int_0^{\infty} S_0(x, \tau) e^{-p\tau} d\tau, \quad \theta = \frac{\alpha + (\beta\mu + \nu_0)}{\mu\alpha(\beta + \gamma p)}. \quad (13)$$

Граничное условие (11) в области изображений будет:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{du_0}{dx} (\beta + \gamma p) = - \frac{q_0}{2kmp}. \quad (14)$$

Решение уравнения (12) с учетом граничных условий выразится так:

$$u_0(x, p) = \frac{q_0 \exp(-x \sqrt{\theta})}{2kmp(\beta + \gamma p) \sqrt{\theta}} \quad (15)$$

Для перехода выражения (15) к оригиналу рассмотрим частную задачу для больших значений  $t$ : она представляет большой практический интерес при работе водозаборных сооружений в длительное время. Одновременно это упрощение позволяет преодолеть большие математические трудности.

Учитывая сказанное, уравнение (15) можно представить в следующем виде:

$$u_0(x, p) = \frac{q_0}{2km\beta} \cdot \frac{\exp(-x\omega_2 \sqrt{b+p})}{p \sqrt{b+p}}, \quad (16)$$

где

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{\beta\mu + \nu_0}{\mu\alpha\beta}}; \quad b = \frac{\alpha}{\beta\mu + \nu_0}. \quad (17)$$

После перехода к оригиналу получим:

$$S_0(x, t) = \frac{q_0}{2km\beta\omega_2} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\pi(t-\tau)}} e^{-\frac{\omega_2^2 x^2}{4(t-\tau)}} e^{-\omega(t-\tau)} d\tau \quad (18)$$

Решение (18) применимо для поздних стадий откачек [5]:

$$t > (3 + 5) \frac{r}{\rho} \quad (19)$$

Зависимость, описывающая понижение уровня в нижнем слое, может быть получена из уравнения (6), которое после интегрального преобразования приводится к виду

$$u(x, p) = (\beta + \gamma p) u_0(x, p), \quad (20)$$

а для поздних стадий откачек с учетом критерия (19) —

$$u(x, p) = \beta u_0(x, p). \quad (21)$$

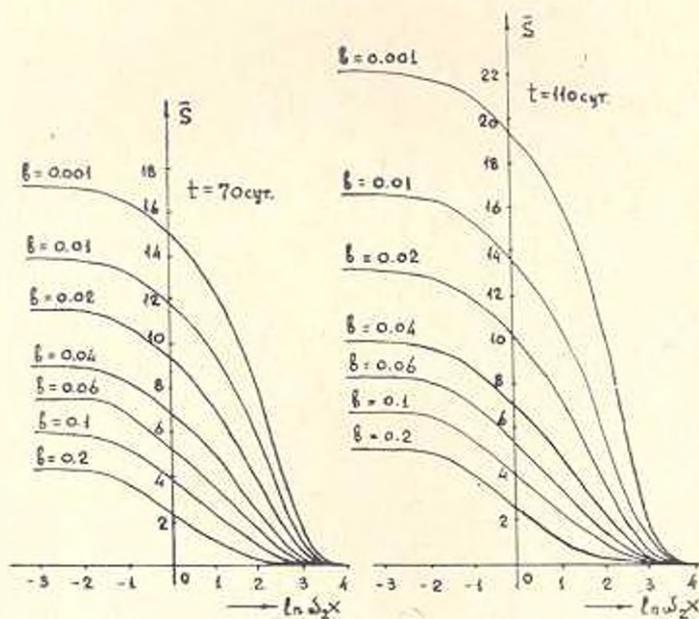


Рис. 2.

Следовательно, окончательная формула для определения понижений в нижнем напорном слое будет иметь такой вид:

$$S(x, t) = \frac{q_0}{2km\omega_2} \int_0^t \frac{1}{1 + (t - \tau)} e^{-\frac{\omega_2^2 x^2}{4(t - \tau)} - b(t - \tau)} d\tau. \quad (22)$$

Для облегчения расчетов произведено табулирование функции  $S(x, t)$  по параметрам  $\bar{S} = \frac{2km\omega_2}{q_0} S$ ,  $\bar{x} = \omega_2 x$ ,  $t$ , для различных значений  $b$  (рис. 2).

Пользуясь формулами (18), (22), можно получить понижение в двух водоносных горизонтах, если задан откачиваемый расход и гидрогеологические параметры водоносных пластов.

По полученным зависимостям произведен расчет линейного водо-забора применительно к гидрогеологическим условиям Араратской равнины. Исходные данные:  $\alpha = 0,00533$  1/сут;  $km = 3000$  м<sup>2</sup>/сут;  $m_0 = 20$  м;  $k_0 = 0,1$  м/сут;  $q_0 = 129,6$  м<sup>3</sup>/сут;  $z = 100$  м;  $\rho_0 = 0,14$ ;  $\mu = 0,02$ .

Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица

$t = 70$  сут

X	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$S_0$	12,2	11,5	10,2	9,1	8,2	7,3	6,5	5,7	5,0	4,4	3,9
S	25,1	23,6	20,9	18,8	16,9	15,1	13,3	11,8	10,4	9,1	8,1

$t = 80$  сут

$S_0$	12,5	11,7	10,3	9,2	8,3	7,5	6,6	5,9	5,2	4,6	4,1
S	25,7	24,1	21,2	19	17,2	15,4	13,7	12,1	10,7	9,5	8,4

$t = 90$  сут

$S_0$	12,7	11,8	10,4	9,3	8,4	7,6	6,8	6	5,3	4,7	4,2
S	26,2	24,1	21,4	19,1	17,4	15,6	13,9	12,4	10,9	9,7	8,6

$t = 100$  сут

$S_0$	12,9	12	10,4	9,3	8,5	7,7	6,8	6,1	5,4	4,8	4,2
S	26,6	25,7	21,4	19,2	17,5	15,8	14,1	12,6	11,1	9,9	8,7

Երևանի մ. Կ. Մարքա

Ստացվել է 9. XII. 1980

## Է 2. ԱՆՉԱՏՔԱՆ.

### ԵՐԿՇԵՐՏ ՄԵԶԱՎԱՅՐՈՒՄ ԳՐՈՒՆՏԱՆՔԻ ՋՐԵՐ ԳՆԱՅԻՆ ԳՆԱՎԱՐՈՒՄԸ ԶՐԶՈՐՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ԲՆՅԵՎՏՐԱՅԻՆ, ՍԵՄԱՆ ՀԱՇՎԱՐՈՒՄԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Տրվում են լուծումներ, երբ գծային ձևով դասավորված ուղղաձիգ ջրհորերի համակարգը աշխատում է երկչիրտ ֆիլտրացնող միջավայրում: Անրին ժամկող շերտում ինֆիլտրային սնումը բնդունվում է համեմատական գրունտային ջրերի խորությանը: Ստացված են իրենցումների ֆունկցիաներ, ինչպես գրունտային, այնպես էլ ձնշումային ջրատար խորիզոններում ժամանակի մեծ արժեքների համար: Զրատար շերտերի սարքերը բնութագրերի համար կազմված է ստացված ֆունկցիաների աղյուսակ:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Аноним А. К. Дренаж при орошении соляных солончаков. М. «Колос», 1971, 272 с.
2. Боченер Ф. М. и др. Проектирование водозаборов подземных вод. М., Строиниздат, 1976, 292 с.
3. Боченер Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных линзов подземных вод. М., «Недра» 1968, 325 с.
4. Хичитрян Э. А. Расчет линейного водозабора в четырехслойной фильтрационной среде «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXXII, № 2, 1979, с. 34—39.
5. Боченер Ф. М., Дамишвиличюс А. В. Расчет водозаборов подземных вод в двухслойных пластах с учетом дифференциального питания. Тр. институт. «Инженерия гидрогеология», вып. 70, М., 1977, с. 3—5.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

О. В. ЛЕОНОВ

НЕКОТОРЫЕ ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
 ЗНАКОВЫХ КОРРЕЛЯТОРОВ

При измерении коэффициента корреляции знаков по реализациям конечной длины измеряется не точное значение коэффициента, а некоторая его оценка  $R$ , являющаяся случайной величиной. Близость оценки действительному коэффициенту корреляции определяется ее дисперсией, которую можно вычислить двояко. В силу того, что коэффициент корреляции знаков является математическим ожиданием некоторой случайной величины  $z$  [1], его дисперсия может быть определена согласно [2]:

$$\sigma_R^2 = \frac{2}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) B_z(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $\sigma_R^2$  — дисперсия оценки коэффициента корреляции знаков  $\tilde{R}$ ;  $T$  — интервал наблюдения;  $B_z(\tau)$  — корреляционная функция процесса  $z$ .

Другая возможность определения дисперсии такова. Из закона больших чисел следует, что если математическое ожидание некоторой случайной величины определяется по  $N$  независимым замерам, то дисперсия математического ожидания связана с дисперсией случайной величины зависимостью:

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{N} \sigma_z^2.$$

Количество независимых замеров вычисляется по известному времени наблюдения и интервалу, через который можно считать независимыми производимые замеры. Более точно, чем через полную пропускания, длительность этого интервала оценивается временем корреляции. Его определение для оценки шага квантования по времени непрерывной реализации сводится к соотношению

$$\tau_c = \int_0^T |K_z(\tau)| d\tau.$$

где  $K_z(\tau)$  — нормированная корреляционная функция процесса. Имея  $\tau_k$ , можно определить дисперсию измеряемого коэффициента корреляции

$$\sigma_{R'}^2 = \frac{\sigma_z^2}{T/\tau_k} = \frac{\sigma_z^2}{T} \int_0^T |K_z(\tau)| d\tau. \quad (2)$$

Очевидно, что дисперсия, вычисленная по выражению (1), будет более точной, т. к. нельзя с полным основанием утверждать, что замеры, разделенные временем  $\Delta t = \tau_k$ , являются абсолютно статистически независимыми. С этой точки зрения представляет интерес вычисление дисперсий по обоим выражениям с последующим сравнением полученных результатов.

Так как  $z$  представляет из себя преобразованную фазу смеси гармонического сигнала с нормальным шумом, дисперсия  $z$ , а следовательно, и дисперсия  $R$ , будет зависеть от отношения сигнал-шум и достигать максимального значения при приеме только шума ( $S = 0$ ). Этот случай, представляющий наибольший интерес, будет рассмотрен в дальнейшем, т. к. он позволяет оценить максимально возможную ошибку при измерении коэффициента корреляции знаков.

Корреляционная функция процесса  $z$  и его коэффициент корреляции согласно [3] имеют следующий вид:

$$B_z(\tau) = \frac{32}{\pi^3} \sum_{k=1}^{\infty} a_k R_0^{2k-1}; \quad (3)$$

$$K_z(\tau) = \frac{96}{\pi^3} \sum_{k=1}^{\infty} a_k R_0^{2k-1}. \quad (4)$$

Здесь

$$a_k = f(n=0; m=k) + f(n=1; m=k-1) + \dots \\ \dots + f(n=k-1; m=1) - f(n=0; m=k-1) - \\ - f(n=1; m=k-2) - \dots - f(n=k-2; m=1),$$

где

$$f(n, m) = \frac{[2[(n+m)-1]!]^2}{2^{2(n+m)} \cdot n! \cdot (2m+n-1)! (2m-1)!}$$

Там же даются значения десяти коэффициентов  $a_k$ , позволяющие с высокой точностью вычислить корреляционную функцию при заданном  $R_0$ , который зависит от типа фильтра, на выходе которого ведется измерение коэффициента корреляции знаков, и определяется выражением:

$$R_0(\tau) = \sqrt{R_c^2(\tau) + R_s^2(\tau)}.$$

При представлении стационарного нормального шума на выходе узкополосной системы в виде суммы косинусной и синусной составляющих

со случайными амплитудами,  $R_c(\tau)$  — коэффициент корреляции, общий для амплитуд косинусной и синусной составляющих, а  $R_s(\tau)$  — коэффициент взаимной корреляции тех же амплитуд [4]. Эти коэффициенты связаны с энергетическим спектром зависимостью:

$$R_c(\tau) = \frac{\int_0^{\infty} F(\omega) \cos(\omega - \omega_0)\tau d\omega}{\int_0^{\infty} F(\omega) d\omega}; \quad (5)$$

$$R_s(\tau) = \frac{\int_0^{\infty} F(\omega) \sin(\omega - \omega_0)\tau d\omega}{\int_0^{\infty} F(\omega) d\omega}, \quad (6)$$

где  $F(\omega)$  — энергетический спектр;  $\omega_0$  — резонансная частота.

Подставив выражения (3) и (4) в (1) и (2), соответственно, для дисперсий получим:

$$\sigma_{\frac{2}{R}}^2 = \frac{64}{\pi^3} \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{\infty} a_k \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_0^{2k-1}(\tau) d\tau; \quad (7)$$

$$\sigma_{\frac{2}{R}}^2 = \frac{32}{\pi^3} \frac{1}{T} \int_0^T \left| \sum_{k=1}^{\infty} a_k R_0^{2k-1}(\tau) \right| d\tau. \quad (8)$$

Для проведения дальнейших сравнений следует задаться конкретным типом фильтра. Положим, что имеем фильтр типа колебательного контура и энергетический спектр шума симметричен относительно его центральной частоты  $\omega_0$ . Энергетический спектр на выходе фильтра определяется выражением:

$$F(\omega) = \frac{2\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2},$$

где  $\alpha$  — постоянная, определяемая параметрами элементов фильтра.

Вычисление  $R_c(\tau)$  и  $R_s(\tau)$  даст:

$$R_c(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}, \quad R_s(\tau) = 0.$$

Следовательно:

$$R_0(\tau) = R_c(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}.$$

Подставив полученное в выражения для дисперсий, будем иметь:

$$\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \frac{64}{\pi^2} \left[ \frac{1}{\alpha T} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2k-1} - \frac{1}{(\alpha T)^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{(2k-1)^2} (1 - e^{-(2k-1)\alpha T}) \right]; \quad (9)$$

$$\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \frac{32}{\pi^2} \frac{1}{\alpha T} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2k-1}. \quad (10)$$

Проведем сравнение полученных выражений с ограниченным рядом десятью членами.

Выражения (9) и (10) дают равные значения дисперсий ( $\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \sigma_{\frac{z}{R}}^2 = 0,193$ ) при  $\alpha T = 1,42$ . При  $\alpha T < 1,42$  имеет место  $\sigma_{\frac{z}{R}}^2 < \sigma_{\frac{z}{R}}^2$ . Выражение (9) при  $\alpha T \rightarrow 0$  дает  $\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \frac{1}{3} = \sigma_{\frac{z}{R}}^2$ . Выражение (10) имеет смысл лишь до минимальных значений  $T_{\min} = \tau_k$ , чему соответствует  $\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \frac{1}{3} = \sigma_{\frac{z}{R}}^2$  и  $\alpha T = 0,83$ .

При  $\alpha T > 1,42$  очевидно должно иметь место обратное неравенство:  $\sigma_{\frac{z}{R}}^2 > \sigma_{\frac{z}{R}}^2$ . Для более наглядного сравнения дисперсий при больших  $\alpha T$  вынесем первый член из квадратных скобок выражения (9):

$$\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \frac{64}{\pi^2} \frac{1}{\alpha T} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2k-1} \left[ 1 - \frac{1}{\alpha T} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{(2k-1)^2} (1 - e^{-(2k-1)\alpha T})}{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2k-1}} \right]$$

При достаточно больших  $\alpha T$  второй член в квадратных скобках много меньше единицы, так что можно принять:

$$\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \frac{64}{\pi^2} \frac{1}{\alpha T} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2k-1}$$

Полученное значение дисперсии в два раза больше дисперсии  $\sigma_{\frac{z}{R}}^2$ : покажем это. Согласно выражению, приведенному в [2]:

$$\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \frac{2}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) B_z(\tau) d\tau = \frac{2\sigma_z^2}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) K_2(\tau) d\tau.$$

Второе равенство следует из того, что при приеме только шума математическое ожидание  $z$  равно нулю, и, следовательно,

$$K_2(\tau) = \frac{B_z(\tau) - z^2}{\sigma_z^2} = \frac{B_z(\tau)}{\sigma_z^2}.$$

Функция  $K_2(\tau)$  положительна для всех  $\tau$ , следовательно,  $|K_2(\tau)| = K_2(\tau)$ . С другой стороны, вследствие того, что  $T$  велико, при возрастании  $\tau$  от 0 до  $\infty$  функция  $1 - \frac{\tau}{T}$  остается близкой единице в достаточно широких пределах изменения  $\tau$ . Функция же  $K_2(\tau)$  с возрастанием  $\tau$  быстро монотонно убывает, стремясь к нулю. Следовательно, можно приближенно принять, что  $K_2(\tau) \approx \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \cdot K_2(\tau)$  и тогда:

$$\sigma_{\frac{z}{R}}^2 \approx \frac{2\sigma_z^2}{T} \int_0^T |K_2(\tau)| d\tau = 2 \frac{\sigma_z^2}{T^2} = 2\sigma_{\frac{z}{R}}^2.$$

Если не требуются высокие точности в вычислении дисперсии, то для длинных реализаций можно считать статистически независимыми замеры через время  $\Delta t = 2\tau_k$  и определять дисперсию по выражению:

$$\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \frac{\sigma_z^2}{T^2} = \frac{64}{\pi^2} \frac{1}{2T} \sum_{k=1}^N \frac{a_k}{2k-1} \approx \frac{0,543}{2T}. \quad (11)$$

Погрешность в вычислении дисперсии согласно выражению (11) возрастает по мере уменьшения  $T$ . Выражение имеет смысл до  $T_{\min} = 2\tau_k$ .

Этому значению  $T$  соответствует  $\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \frac{1}{3}$  и  $2T = 1,63$ . При данном

$\alpha T$  дисперсия, вычисленная по выражению (9), равна  $\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = 0,18$ , т. е. дисперсии различаются почти в два раза. Полученные результаты свидетельствуют о том, что не следует пользоваться выражением (11) для вычисления дисперсии при малом  $\alpha T$ .

Дисперсию можно выразить также и через ширину полосы пропускания системы, т. к. последняя однозначно связана с постоянной  $\alpha$ . Связь между ними для взятого нами фильтра имеет вид:

$$\alpha = 4,8\Delta f,$$

где  $\Delta f$  — ширина полосы на уровне 0,7.

С учетом этого будем иметь:

$$\begin{aligned} \sigma_{\frac{z}{R}}^2 &= \frac{64}{4,8\pi^2} \left[ \frac{1}{\Delta f T} \sum_{k=1}^N \frac{a_k}{2k-1} - \frac{1}{4,8(\Delta f \cdot T)^2} \times \right. \\ &\quad \left. \times \sum_{k=1}^N \frac{a_k}{(2k-1)^2} (1 - e^{-4,8(2k-1)\Delta f T}) \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

Кривая зависимости  $\sigma_{\frac{z}{R}}^2 = \sqrt{\frac{\sigma_z^2}{R}} = F(\Delta f \cdot T)$  представлена на рис. 1.

Полученная дисперсия позволяет определить точность измерения коэффициента корреляции знаков по реализациям конечной длины. Последнюю можно оценить доверительным интервалом  $\pm \Delta R$ , в который с заданной вероятностью  $\beta$  попадает измеренное значение коэффициента корреляции. Закон распределения оценки математического ожидания можно принять нормальным [5]. В этом случае вероятное отклонение измеренного  $\bar{R}$  от точного значения вычисляется по выражению:

$$\pm \Delta R = \pm t_{\beta} \sigma_{\bar{R}},$$

где  $t_{\beta} = |2 \arg \Phi(\beta)|$ ;  $\beta$  — вероятность попадания в интервал;  $\arg(\Phi)\beta$  — функция, обратная интегралу вероятностей.

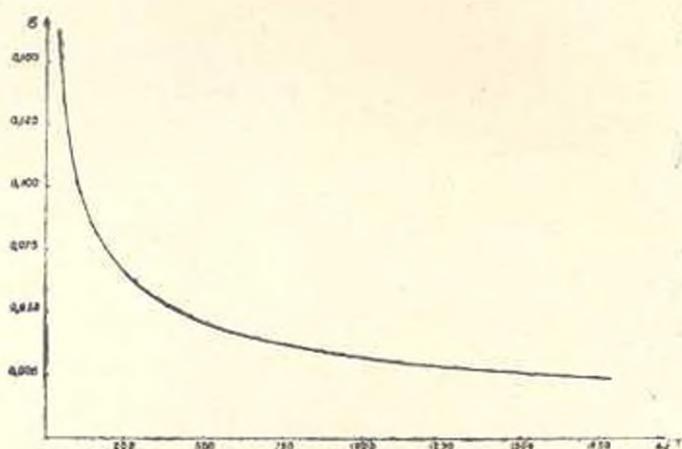


Рис. 1. Зависимость среднеквадратичного отклонения измеряемого коэффициента корреляции знаков от интервала наблюдения в полосы пропускания системы.

Значения функции  $\Phi(\beta)$  даются в виде таблицы. Если задать  $\beta > 0,999$ , то  $t_{\beta}$  оказывается равным 3,3. Следовательно, событие, заключающееся в попадании  $\bar{R}$  в доверительный интервал шириной  $2 \cdot \Delta R = 2 \cdot 3,3 \cdot \sigma_{\bar{R}}$ , практически достоверно.

Перейдем к оценке точности в определении отношения сигнал—шум  $S$  и фазы  $\varphi$  сигнала по измеренным коэффициентам корреляции знаков. При слабых сигналах в [1] получены следующие зависимости:

$$R_1 = 0,5S \cos \varphi,$$

$$R_2 = 0,5S \sin \varphi,$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — коэффициенты корреляции смеси и двух опорных сигналов, разнесенных по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ .

Указанные зависимости позволяют определить  $S$  и  $\psi$ :

$$S = 2\sqrt{R_1^2 + R_2^2}; \quad (13)$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{R_2}{R_1}. \quad (14)$$

Отношение сигнал—шум  $S$  можно интерпретировать как модуль некоторого вектора  $\vec{S}$  с проекциями  $S_r = S \cos \psi = 2R_1$  и  $S_y = S \sin \psi = 2R_2$  с начальным углом  $\psi$ . При изменении  $R_1$  и  $R_2$  в пределах  $-1 < R_{1,2} < 1$  конец вектора  $\vec{S}$  описывает окружность радиуса  $S$ . Будем считать, что отклонения обоих измеренных значений  $R_1$  и  $R_2$  лежат в пределах равных доверительных интервалов  $\pm \Delta R$ . В этом случае конец вектора  $\vec{S}$  может находиться в любой точке области, ограниченной квадратом со стороной  $4\Delta R$ . Центр квадрата лежит на окружности радиуса  $S$  (рис. 2). Задача оценки точности в вычислении

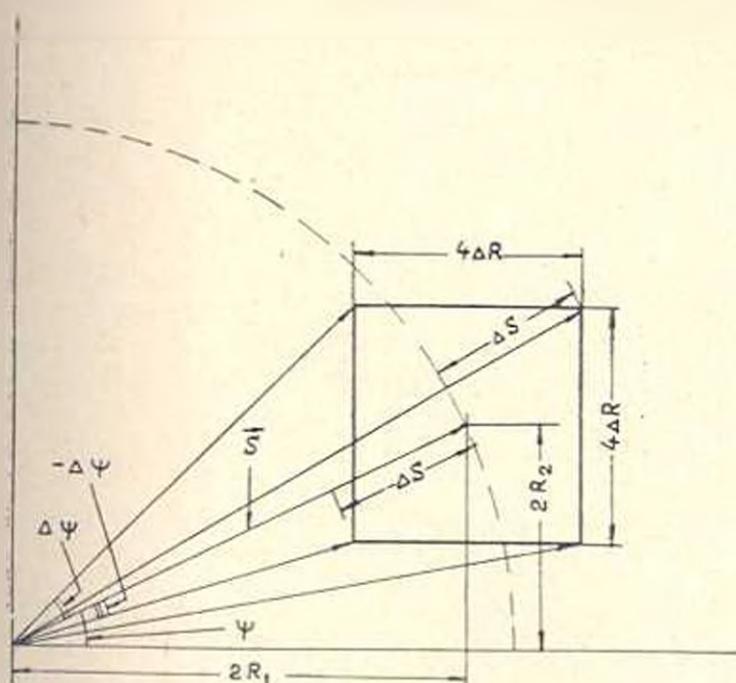


Рис. 2. Иллюстрация погрешностей, возникающих при определении отношения сигнал—шум смеси и фазы сигнала.

$S$  и  $\psi$  по выражениям (13) и (14) сводится к определению максимальных из наибольших отклонений  $\Delta S_{\max}$ ,  $-\Delta S_{\max}$ ,  $\Delta \psi_{\max}$  и  $-\Delta \psi_{\max}$  при изменении  $\psi$  в пределах  $-\pi < \psi < \pi$ . Наибольшие отклонения соответствуют скольжению конца вектора  $\vec{S}$  по периметру квадрата. Очевидно, для решения этой задачи достаточно провести анализ при

изменении  $\psi$  в пределах  $0 \leq \psi \leq \pi/2$ , т. к. далее картина будет повторяться.

Зависимости наибольших отклонений  $\Delta S$ ,  $-\Delta S$ ,  $\Delta\psi$  и  $-\Delta\psi$  при изменении  $\psi$  в пределах от 0 до  $\pi/2$ , в предположении, что длина вектора  $\bar{S}$  больше диагонали квадрата, представлены на рис. 3 и 4. Максимумы наибольших отклонений отношения сигнал-шум достигаются при одном и том же угле  $\psi = \pi/4$  и равны

$$\Delta S_{\max} = |-\Delta S_{\max}| = 2\sqrt{2}\Delta R.$$

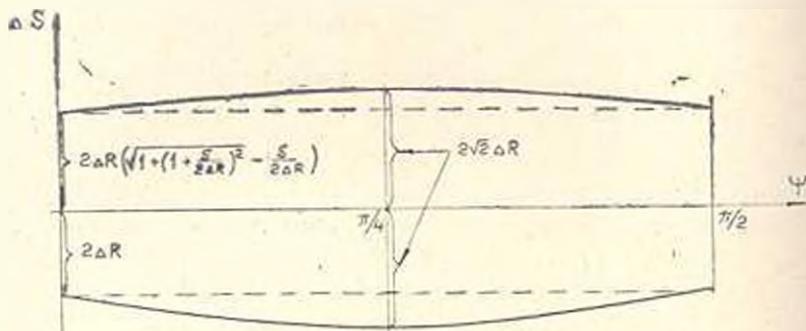


Рис. 3. Зависимость наибольших отклонений определяемого отношения сигнал-шум от фазы сигнала.

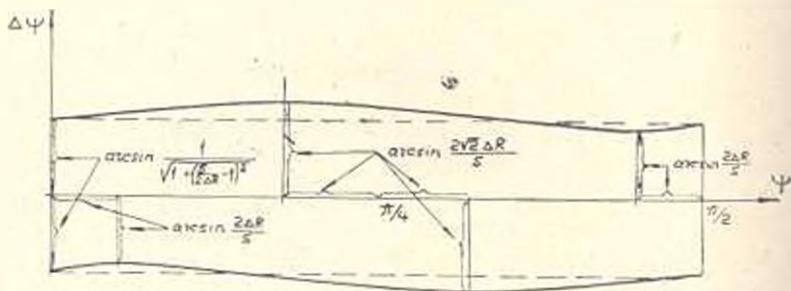


Рис. 4. Зависимость наибольших отклонений определяемой фазы сигнала от значений самой фазы.

Этого нельзя сказать относительно отклонений фазы. Здесь максимумы достигаются при углах  $\psi_{1,2} = \frac{\pi}{4} \pm \arcsin\left(\frac{2\sqrt{2}\Delta R}{S}\right)$ . Однако, для малых  $\Delta R/S$ , разность между  $\Delta\psi_{\max}$ ,  $-\Delta\psi_{\max}$  и значениями функций  $\Delta\psi$  и  $-\Delta\psi$  при угле  $\psi = \pi/4$  мала.

Если обозначить максимальное относительное отклонение в определении  $S$  через  $\delta = \Delta S_{\max}/S$ , то оно будет связано с  $\frac{\Delta R}{R}$  следующей зависимостью:

$$\delta = \frac{2\sqrt{2}\Delta R}{S} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 3,3\frac{\Delta R}{R}}{S} = 9,33 \frac{\Delta R}{S}.$$

Максимальное значение наибольших отклонений фазы выразится через  $\delta$  так:

$$\Delta\psi_{\max} = |-\Delta\psi_{\max}| = \arcsin\left(\frac{2|2\Delta R|}{S}\right) = \arcsin\delta.$$

Задаваясь допустимым максимальным относительным отклонением, можно найти среднеквадратичное отклонение  $\frac{\Delta R}{R}$ , а по нему и  $\Delta f \cdot T$  для определенного данного  $S$  с заданной точностью. При этом оценивается и максимальная ошибка в определении фазы.

Можно задаться допустимым максимальным отклонением в определении фазы ( $\Delta\psi_{\max}$ ) и найти  $\Delta f \cdot T$ , обеспечивающее при данном  $S$  отклонение не больше заданного. Если положим, требуется определить малые  $S$  (пусть  $S \leq 0,5$ ) с относительной ошибкой не более 25% ( $\delta \leq 0,25$ ), то необходимо обеспечить  $\frac{\Delta R}{R} \leq 0,0134$  и  $\Delta f \cdot T \geq 630$ .

Ошибка в определении фазы при этом составит менее  $\approx 14,5^\circ$ .

Найденное значение величины  $\Delta f \cdot T$  свидетельствует о том, что для достижения высоких точностей в определении  $S$  и  $\psi$  следует брать длительные интервалы наблюдения.

Полученные результаты следует применять только для слабых сигналов, когда отношение сигнал/шум меньше единицы.

ЕрIII им. К. Маркса

Поступило 25 II 1980

Ս. Վ. ԸՆՆՈՒՎ

ՆՇԱՆԱՅԻՆ ԿՈՐԵԼՅԱՏՈՐՆԵՐԻ ՃՇԳՐՏՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇ ԲՆՈՒԹԱԿԵՐԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Գտնված է նեղ շերտով նորմալ աղմուկի հետ խառնված հարմոնիկ ազդանշանի և այդ հարմոնիկի հաճախականությանը հիմնային ազդանշանի նշանի կորելացիայի գործակցի դիսկրետիայի առավելագույն արժեքը վերջավոր տևողությամբ շափումների դեպքում:

Քայլ ազդանշանների համար ստացված են արտահայտություններ, որոնք հնարավորություն են տալիս գնահատելու խառնուրդի ազդանշանաղմուկ հարաբերության և ազդանշանի ֆազի որոշման սխալը կորելացիայի գործակցի երկու շափումների օգնությամբ:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бурунсузян Э. С., Леонов О. В. Об одном методе определения отношения сигнал-шум. «Радиотехника и электроника», т. XV, № 11, 1970.
2. Давенпорт В. Б., Рут В. Л. Введение в теорию случайных сигналов и шума. М., «Иностранная литература», 1960.
3. Бурунсузян Э. С., Аюкян С. А., Леонов О. В. К вопросу определения корреляционной функции преобразованных знаковых процессов. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXVII, № 5, 1974.
4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М., «Советское радио», 1966.
5. Венгцель Е. С. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1969.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. Р. ВАРДАНИ

ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ  
 ДАВЛЕНИЯ В ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

При работе двигателей внутреннего сгорания и дизелей возникают ударные нагрузки и вибрации и поэтому к чувствительным элементам датчиков предъявляют высокие требования устойчивости механической системы.

Установку датчика на двигателе считают идеальной при размещении чувствительного элемента вровень с внутренней поверхностью стенки цилиндра или крышки. Осуществить такую установку удается в редких случаях. В большинстве между датчиком и полостью цилиндра имеется соединительный канал (канал индицирования), который в неблагоприятных условиях может явиться источником серьезных искажений индикаторной диаграммы. Индикаторный канал, будучи заполненным упругим газом, совместно с объемом датчика под чувствительным элементом образует колебательную систему, передающую давление из цилиндра на чувствительный элемент. Точность передачи давления при этом зависит от частотных характеристик индикаторного канала, которые могут быть рассчитаны методом акустики [1].

Средняя температура стенок индикаторного канала, размещенного в центре цилиндра дизеля, составляет  $350 \pm 500^\circ\text{C}$ . Примерно такую же среднюю температуру будет иметь и газ, заполняющий канал [1].

Рассматривая давление как функцию времени, можно написать выражение относительной погрешности при индицировании [1]:

$$\delta P = \frac{\frac{dP}{dt} dt}{P(t)} \quad (1)$$

Рассматривая индикаторную диаграмму для участка нарастания давления при сгорании по (1), можно записать:

$$\delta P_{cr} = \frac{\left(\frac{dP}{dt}\right)_{cr} dt}{P_{cr}} \quad (2)$$

где  $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{cr}$  — скорость нарастания давления между значением  $P_1$  и

$P_{cr}$  при приращении времени  $\Delta t_{cr}$  (приближенно определяется  $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{cr} \approx \frac{P_{cr} - P_1}{\Delta t_{cr}}$ ):  $P_{cr}$  — максимальное значение давления сгорания при приращении времени  $\Delta t_{cr}$ .

Можно допустить, что период свободных колебаний измерительной системы  $T$  равен приращению времени  $\Delta t_{cr}$  ( $T \approx \Delta t_{cr}$ ). Это позволяет сравнительно точно определить частоту собственных колебаний чувствительного элемента.

Принимая погрешность  $\delta P_{cr}$  заданной по выражению (2), определяется требуемое значение свободных колебаний измерительной системы:

$$f_0 = \frac{1}{T} \approx \frac{P_{cr} - P_1}{P_{cr} \cdot \delta P_{cr} \cdot \Delta t_{cr}} \quad (3)$$

Приняв для быстроходного дизеля  $\delta P_{cr} \approx 1\%$ ,  $\Delta t_{cr} = 0,0015$  сек, абсолютное давление сгорания  $P_{cr} = 120$  кгс/см<sup>2</sup>,  $P_1 = 40$  кгс/см<sup>2</sup>, получим частоту свободных колебаний:  $f_0 = 44$  кГц.

Датчик с полученной частотной характеристикой регистрирует в рассмотренных условиях давление сгорания  $P_{cr}$  с погрешностью  $\delta P_{cr} \approx 1\%$ .

Вышеприведенный расчет показывает, что для точного воспроизведения давления в канале индицирования собственная частота колебаний чувствительного элемента для быстроходных дизелей должна быть не ниже 40–50 кГц.

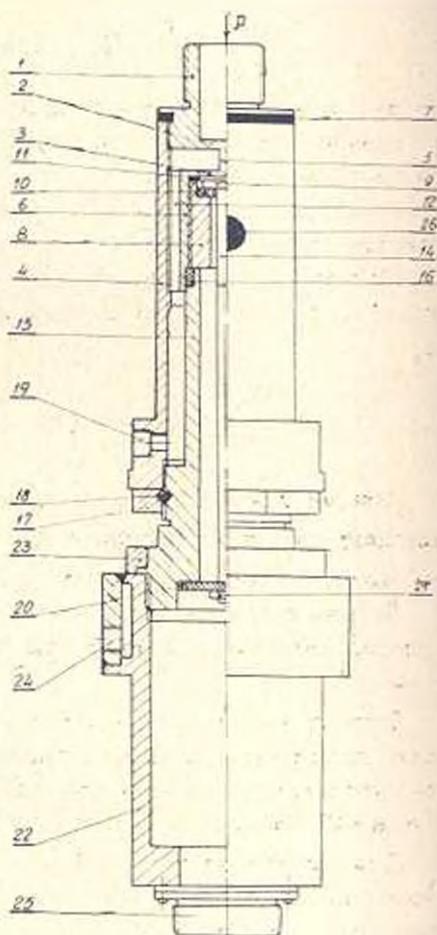
Для измерения давлений в цилиндре дизеля применяют тензометрические, пьезоэлектрические и емкостные датчики. Последние выгодно отличаются от других простотой конструкции, возможностью статической градуировки и др. Они сравнительно легко могут быть выполнены с собственной частотой 50 кГц и выше. Учитывая это, для измерения давления разработаны несколько вариантов емкостных датчиков с двумя смещенными мембранами, связанными между собой изогнутым штоком [2]. Разделение двух мембран позволяет произвести интенсивное охлаждение и максимально сократить длину канала индицирования.

На рис. 1 приведена конструкция емкостного датчика давления.

Работа датчика происходит так. Приложенное на мембрану 2 давление  $P$  через шток в виде силы передается к подвижному электроду 3, образующему с неподвижным электродом 9 емкость, входящую в схему моста. Мост питается от автогенератора с кварцевой стабилизацией с частотой 1–4 МГц. Изменение емкости приводит к амплитудной модуляции выходного напряжения моста. Этот сигнал после детектирования подается к одному из входов операционного усилителя, второй вход которого служит для регулирования. Выходной сигнал усилителя при этом будет пропорциональным значению приложенного давления. В

пределах деформации центра мембраны на величину  $1 \div 2\%$  от зазора имеется линейная зависимость «вход—выход».

Рис. 1. Разрез емкостного датчика давления: 1 — наконечник; 2 и 3 — мембраны; 4 — корпус; 5 — шток; 6 — нижний стакан измерительной головки; 7 — сварной шов; 8 — втулка; 9 — неподвижный электрод; 10, 20 — изоляционные шайбы; 11 — прокладки из фольги; 12, 13 — пазы; 14 — удлинительный стержень; 15 — стягивающая стержень; 16 — резиновая прокладка; 17, 23 — контргайки; 18 — уплотняющая прокладка; 19, 24 — места закрепления штуцеров; 21 — стягивающая гайка; 22 — корпус схемной части; 25 — разъем; 26 — места сварки.



Частоту собственных колебаний двухмембранной системы можно определить по формуле [3]:

$$\omega = \frac{\gamma K^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (4)$$

где  $K$  — коэффициент, зависящий от условий работы мембраны (для защемленной по контуру ненапряженной мембраны:  $K=3,196$ );  $a, h$  — радиус и толщина мембраны;  $\rho$  — плотность материала мембраны;

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  — цилиндрическая жесткость ( $E$  — модуль упругости;

$\nu$  — коэффициент Пуассона);  $\gamma$  — коэффициент, значение которого при-

мерно определяется выражением  $\gamma = \left(1 + \frac{F_{ш} + F_{ж}}{F_m}\right)^{-\frac{1}{2}}$  ( $F_m, F_{ш}, F_{ж}$  —

$F_m$  — вес мембраны, штока и жидкости, наполняющей межмембранный

промежутки). Было допущено, что деформация обеих мембран происходит при равномерно распределенной нагрузке. Частота дополнительной массы штока, а также массой охлаждающей воды между мембранами из-за малости их можно пренебречь ( $\eta = 1$ ).

В датчике применена хромоникелевая сталь аустенитного класса (например, 18Х9НТ). Такие стали жаропрочны и после изготовления не требуют специальной термообработки.

Для системы двойных мембран диаметром 13 мм, толщиной 2,2 мм, при штоке длиной 4 мм и диаметром 2,5 мм собственная частота колебаний составила 45 кГц. Изменением геометрических размеров чувствительного элемента эту частоту можно много увеличить.

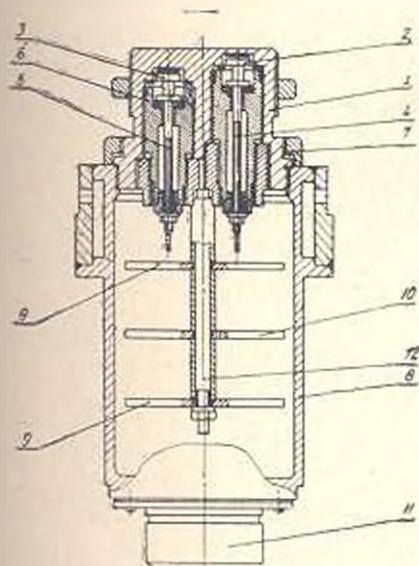


Рис. 2. Разрез компенсационного емкостного датчика давления: 1 — корпус измерительной головки; 2, 3 — неподвижные электроды; 4, 5 — стержневые выводы неподвижных электродов; 6 — втулка; 7 — контргайка; 8 — корпус схемной части датчика; 9 — печатные платы; 10 — экран; 11 — разъем; 12 — шпилька.

Водяная оболочка между двумя мембранами почти не влияет на собственную частоту чувствительного элемента. Изменение давления охлаждающей воды в пределах 0,5 ÷ 2,0 атм не влияет на результаты измерения. Наличие возможности регулирования измерительной схемы позволяет произвести нормальную работу датчика в пределах изменения температуры + 20° ÷ + 450°C. При вышеуказанных размерах мембран, датчик регистрировал давление 140 атм с приращением выходного напряжения 6,0 ÷ 7,0 В.

В дизельном двигателе имеются узлы, где измеряемое давление (0 ÷ 10 кгс/см<sup>2</sup>) не сопровождается высокой температурой (в пределах 60°C ÷ 200°C, продувочный насос, давление масла и др.). В таких случаях нет необходимости применения датчика с интенсивным охлаждением чувствительных элементов. Кроме того, удаленность центра цилиндра от наружной поверхности дна значительно увеличивают габаритные размеры датчика и его паразитную емкость по сравнению с полезной.

Учитывая это, разработаны емкостные датчики, разрезы одного из которых показаны на рис. 2. В нем водяное охлаждение применено только для цилиндрического корпуса ехемной части датчика.

Они нормально могут работать при температуре до  $-200^{\circ}\text{C}$ . Расположение измерительных и компенсационных емкостных ячеек в одной головке позволяет значительно увеличить термостабильность с включением емкостей в разные плечи измерительного моста. Рассмотренная конструкция датчика обеспечивает также высокое быстродействие и может найти применение не только в дизельном двигателе, но и в объектах, где давление сопровождается высокой температурой и большой скоростью изменения.

Некоторое увеличение диаметра измерительной головки (рис. 2) затрудняет закрепление датчика к объекту исследования и поэтому были использованы специальные переходники. Для получения высоких частотных свойств с исключением термообработки измерительной головки в качестве материала была использована хромоникелевая сталь марки 18Х9НТ.

Характеристики «вход—выход» приведенных датчиков были сняты на грузопоршневом манометре и имели линейный характер.

В натуральных условиях проведенные эксперименты показали вполне удовлетворительные результаты.

ЕрПН им. К. Маркса

Поступило 30. IX. 1980

Վ. Խ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

### ԳԻՉԵԼԱՅԻՆ ՇԱՐՄԻՉՆԵՐՈՒՄ ՃՆՇՈՒՄԸ ԿՐԱՆՑՈՎ ՉԵՐՄԱԿԱՅՈՅՈՒՆ ՀԱՅՏՆԵՉՆԵՐ

Ս. մ փ ո փ ո լ մ

Դիտվում է մշակված արագագործ ունակային հայտնիչի կառուցվածքը, որը նախադրված է դիզելի կամ ներքին այրման շարժիչի դիսկում ճնշման շափման համար: Առաջադրված երկու մեմբրանների համակարգը, որոնք մի փոքր տեղաշարժված են և միմյանց հետ կապված են փոքր ձողիկով, հնարավորություն է տալիս իրադարձել զգայուն էլեմենտի ինտենսիվ հովացումն ու գրանցել արագ բնթացող պրոցեսներ:

Դիտվում են նաև ջերմակայուն հայտնիչների այլ կառուցվածքներ, որոնք նախատեսված են մինչև  $200^{\circ}\text{C}$ -ի սահմաններում աշխատելու համար: Կոմպենսացիոն ունակային հայտնիչները ջերմաստիճանի լայն սահմաններում փոփոխման գեղարում ունեն կայուն սմուտ-ելը» չափավորման բնութագիր:

Մշակված հայտնիչները ունեն մեծ արագագործություն ( $40-50$  կՀց—ինդիկատորային կանալ և  $85-95$  կՀց), փորձարկվել են բնական պայմաններում և ցույց են տվել բավարար արդյունքներ:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Стефановский Б. С. и др. Испытание двигателей внутреннего сгорания. М., «Машиностроение», 1972 367 с.
2. Разработка измерительных преобразователей импульсных давлений. ОНИИ, ЕрПИ, Ереван, 1978, отч. по х/д А-672/76, Гос. регистр. В743990, 79 с.
3. Вардиан В. Р. Дифференциальный быстродействующий емкостной преобразователь давления. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXX, № 1, 1977, 40—50 с.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

А. Н. МАДОЕВ, А. О. МИНАСЯН

К ВОПРОСУ ОБНАРУЖЕНИЯ АКТИВИРУЮЩИХ ТОЧЕК  
 ВНУТРЕННИХ ОРГАНОВ И ИХ ПРОЕКЦИИ

Основные понятия и результаты по вопросу висцеральных афферентных проекций подробно изложены в [1—3]. Хотя и неоспоримо, что импульсация от внутренних органов способна достигать высшего отдела центральной нервной системы, попытки зафиксировать изменения амплитудного распределения электроэнцефалограммы — ЭЭГ (в отличие от исследований, проводимых в глубоких слоях структуры мозга) отмечены в литературе, но результаты отсутствуют. Суммарный характер ЭЭГ, а также механизмы конвергенции сигналов разной модальности в коре делают задачу обнаружения проекций внутренних органов на скальп предметом теории статистических решений.

Исследования проводились над больными во время операции, находящимися под наркозом (нейролептанальгезия). Сигналы ЭЭГ со скальпа отводились по обычной методике, биполярно по 16-ти каналам. Механическому раздражению (накальвание с вращением) подвергались удаляемые части внутренних органов — желудка и желчного пузыря. Эти раздражения были одиночными, с целью исключения образования временной дисперсии сигналов — фактора, ограничивающего различение.

Сегментарные участки ЭЭГ регистрировались 16-ти каналным магнитофоном методом ШИМ, демодулировались и через многоканальный преобразователь «аналог-код» вводились в ЭВМ Наирн-21М, обеспечивающую запись информации в темпе приема с последовательным ее сжатием. Учитывая, что процесс ЭЭГ в общем широкополосный, сегментарные участки перед вводом в ЭВМ подвергались преобразованию подобно [4]. Решение о наличии или отсутствии полезного сигнала-отклика (с. о.) на фоне ЭЭГ принимается по превышению переменного

порога, модулем корреляционного интеграла:  $\int_0^T u^T(t) X(t) dt$ , где

$u^T(t)$  — вектор-строка входных сигналов — совокупность  $n$  ЭЭГ;  $X(t)$  — вектор-столбец оптимальных опорных сигналов.

Сигнал, считываемый со скальпа, объединяет сигналы многих глубоких структур мозга, непосредственно не принимающих участия в формировании с. о., и трактуются нами как шум. Несмотря на одинаковые азтоспектральные плотности, величина связи между внутрисейронными волнами и суммарной ЭЭГ в норме остается слабой [5]. Поэтому происхождение ЭЭГ может рассматриваться от независимых элементов с учетом нелинейности ее параметров.

Задача обнаружения с. о. затруднена тем, что по наблюдаемым ЭЭГ нужно установить истинный (опорный) сигнал-отклик без шума, т. е. нужно решить интегральное уравнение первого рода, на правую часть которого накладывается погрешность. Решение интегрального уравнения первого рода, когда выход замаскирован шумом, требует статистического подхода. Будем считать, что с. о. существует и изменяется не слишком быстро. Оптимальная обработка данных при численном решении интегральных уравнений с помощью системы ортонормальных функций позволяет установить истинный вид выхода  $X_r$ , который используется как опорный сигнал, с определенным законом модуляции. Обычно вместо интегрального уравнения рассматривается, при отмеченных ограничениях, конечная система линейных уравнений:

$$\sum_{s=0}^n K_{rs} Z_s = X_r, \quad r, s = 0, 1, \dots, n. \quad (1)$$

Априорные сведения и вышеуказанное позволяют записать

$$X_r = \sum_{j=0}^n c_j P_j(r), \quad (2)$$

где  $P_j$  — некоторая система ортонормальных функций,  $p < n$  или  $p \ll n$ .

Наложение на с. о. шума не позволяет точно решить (1) (из-за конечности  $p$ ). Его решение по методу наименьших квадратов дает:

$$\bar{X}_{r,opt} = \sum_{j=0}^p \frac{c_j}{1 + \tau_j} P_j(r),$$

где  $\tau_j$  — отношение помеха/сигнал в  $j$ -ом канале обработки — в  $j$ -ом слагаемом разложения (2).

Если считать помеху белым шумом, то, переходя к малым коэффициентам с помощью 2-х систем быстро осциллирующих функций, число членов в  $X_r$  остается сравнительно небольшим (из-за быстрого убывания  $c_j$ ), что приводит к подавлению помех при наличии с. о. Кроме того, помеха/сигнал в  $j$ -ом канале обработки конкретно устанавливается наличие с. о. или его отсутствие —  $|c_j| < 2\sqrt{\tau_j}$ .

Укажем, что наиболее адекватным физической стороне процесса является описание с. о. без шума (множество экспериментальных кри-

вых  $X(t)$ , рассматриваемых в классе  $L_2(0, +\infty)$  функциями, имеющими в общем случае вид [6]:

$$\omega_p(t; \lambda_j) = E_p^{(s_j-1)}(-\lambda_j t; a) t^{s_j-1}$$

при  $a \in (-1, +1)$ , для которых выполнено:

$$\int_0^{\infty} |X(t)|^2 t^n dt < +\infty.$$

В частности:

$$[\omega_p(t, \lambda_j)]_1^{\infty} = \{e^{-|\lambda_j|t} t^{s_j-1}\}_1^{\infty}, \quad (3)$$

где  $\lambda_j$  — корень характеристического уравнения кратности  $s_j$ ,  $s_j > 1$ .

Применение процесса ортогонализации к элементарной последовательности (3) позволяет получить ортонормальную систему функций. Используя (3), можно доказать, что множество экспериментальных кривых указанного класса могут быть воспроизведены в виде импульсной реакции модели авторегрессии скользящего среднего (а. р. с. с.), корни характеристического уравнения линейной схемы которого лежат внутри единичного круга.

Выходной с. о., авторегрессионная модель которого может быть построена известными методами [7] (прямая задача), может быть представлен:  $X_t = X_t + \delta X_t$ . Решая задачу определения процесса  $X_t$  по  $X_t$  (обратная задача) с учетом линейной гипотезы, находится модель незашумленного процесса  $X_t$  по найденным параметрам процесса с шумом и известным параметрам шума. Можно показать, что если процесс  $X_t$  описывается моделью а. р. с. с. порядка  $(p, p)$ , то незашумленный процесс  $X_t$  будет описываться той же моделью а. р. с. с., но порядка  $(p, q)$ , где  $q = 0 + p$ , т. е. имеет место авторегрессионная модель.

Вышеизложенной методикой удалось выявить тесные функциональные связи проекций различных структур мозга на скальп лишь при раздражении определенных низкочастотных участков внутренних органов (рис.). Вся остальная высокопороговая фоновая поверхность, как правило, не приводит к цели. Отличительной особенностью активизирующих точек исследуемых органов является унитарная ниволлюция точек по отношению к передней и задней поверхностям этих органов. Таким образом, парный орган оказывается симметричным. Количество активизирующих точек невелико, что, может быть, косвенно согласуется с современными представлениями о присутствии «болевых» рецепторов во внутренних органах. Измерения и анализ комплексной проводимости активизирующих точек показал их высокое значение по отношению к фоновой поверхности.

Установление активирующих точек приближает нас к детерминированному подходу обнаружения представительства и их связей в коре. Можно предположить, что активирующие точки присущи всем внутренним органам.

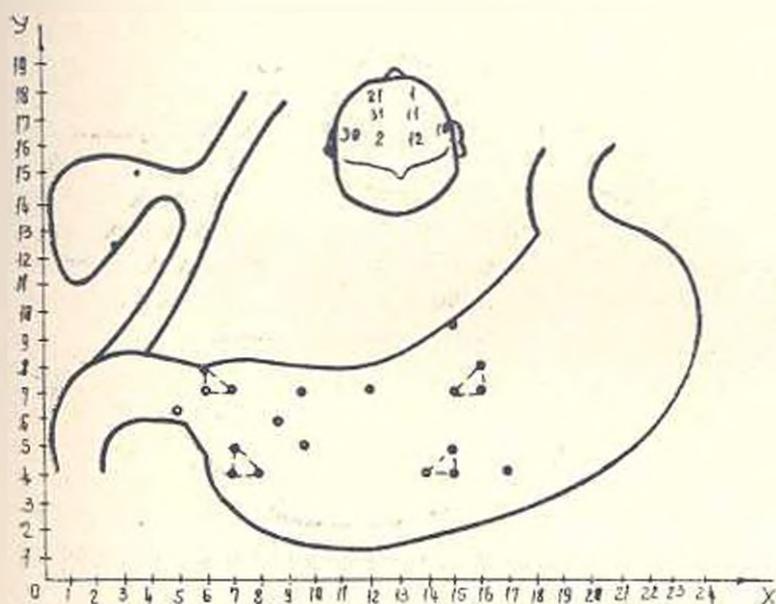


Рис. Карта активирующих точек желудка и желчного пузыря и их проекций.

Предварительный анализ с.о. со скальпа показывает, что для ряда активирующих точек (например, передняя стенка желудка  $X_1, Y_1$  — рис 1) в момент раздражения наблюдается резкое усиление связей (возрастание когерентности) в каналах 1 и 11, 31 и 10 при наличии мощности в спектре на данной частоте. Возрастает также функция взаимной корреляции.

Раздражение ряда других активирующих точек, например,  $X_7, Y_7$ , приводит к сильнейшей десинхронизации в установленных проекциях на скальпе (каналы 1 и 11, 30 и 11) при наличии мощности в спектре и стабильном фазовом сдвиге, с помощью которого удается определить тангенциальное направление возбуждения.

Анализ экспериментальных данных позволяет установить межполушарную симметрию при раздражении активирующих точек в области патологически неизмененных областей (раздражение  $X_1, Y_1$  увеличивает функцию когерентности между каналами 21 и 1, 31 и 11, 30 и 10) и асимметрию при раздражении «язвенных» точек  $X_7, Y_7$  (при раздражении  $X_7, Y_7$  связь между вышеуказанными каналами остается слабой). Полученные данные позволяют надеяться на ее диагностическую ценность. Действительно, поскольку рецепторы кожи, иннервируемые волокнами синаптической нервной системы, заканчиваются также в коре и, учитывая хорошо известный факт о теснейшем взаимодействии между вну-

тренними органами и рецепторными кожными зонами. установлением идентичных с.о. и их связей от воздействия на тактильную систему, можно получить полезную информацию, и это представление является актуальным. При очень высокой фоновой когерентности раздражение активирующих точек не приводит к ощутимому перераспределению. Высокая проводимость активирующих точек позволяет выделить сигнал, анализ которого показывает, какая часть мозга обуславливает нормальное функционирование в другой ее части, и в какой именно. Например, при раздражении активирующих точек желчного пузыря при высокой когерентности представительства и наличии энергетической спектральной плотности, энергия на проекции нервных центров желудка отсасывается в области, проявляющиеся при раздражении желчного пузыря. Характеризуя факт уменьшения энергии, как торможение, получаем тормозное воздействие желчного пузыря на желудок. Справедливо ли обратное — покажут дальнейшие исследования.

Формат ВМЦХ

Поступило 3. XI. 1980

Ա. Ն. ՄԱՐԿՈՎ, Ն. Ն. ՄԱՐԿՈՎԱՆ

**ՆԵՐՔԻՆ ՕՐԳԱՆՆԵՐՈՒՄ ԵՎ ՆՐԱՆՑ ԳՐՈՆԿՅԱԿՆԵՐՈՒՄ  
ԱԿՏԻՎԱՑՆԵՐԿ ԿԵՏԵՐԻ ՀԱՏՏՆԱԲԵՐՄԱՆ ՀՈՐՑԻ ՇՈՒՐՉՄ**

Ա մ փ ո փ ո ս ւ մ

Մշակված մեխոդի, մոդելի և հատուկ ուսումնասիրության օգնությամբ ներքին օրգանների (ստամոքս, լեղապարկ) մակերևույթի վրա հայտնաբերված են ակտիվացնող կետեր, տրված է դրանց տեղաբաշխման պայմանական բարտեզը և ցույց է տրված նրանց ինֆորմատիվությունը:

Ազդանշանները հայտնաբերելու համար մշակված սպարատի միջոցով այդ կետերի զրգոմբը հնարավորություն տվեց ի հայտ բերել ֆունկցիոնալ սերտ կապ գլխուղեղի կեղևի ակտիվացված հատվածների պրոնկցիաների միջև:

Ստացված արդյունքները հնարավորություն կտան գնահատել ինֆորմացիայի ախտորոշական արժեքը, որը ստանում են մարդու գլխամաշկից՝ ներքին օրգանների ակտիվացնող կետերի զրգոման ժամանակ:

**Л И Т Е Р А Т У Р А**

1. Черниговский В. Н. Интерорецепторы. М., «Медицина», 1965.
2. Мусящикова С. С., Черниговский В. Н. Кортикальное и субкортикальное представительство висцеральных систем. Т., «Наука», 1973.
3. Черниговский В. Н., Мусящикова С. С., Сукья М. С. «Известия АН СССР. Серия биология», № 11, 18, 1976.
4. Мадоев А. Н. Модель слухового восприятия с автокорреляционной обратной связью. ДАН, т. 244, № 1, 1979.
5. Эйди Р., Уолтер А. О. В кн. «Достижения медицины и биологической техники», М., «Медицина», 1971.
6. Джербашян М. М. О замкнутости системы типа Минтаг—Леффлера. ДАН, т. 219, № 6, 1974.
7. Хевнин Э. Многомерные временные ряды. М., «Мир», 1974.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

В. С. ВАРՇԵՏՅԱՆ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ХОДОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫХ УСТАНОВОК ПРИ ИМПУЛЬСНО-РЕКУПЕРАТИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

При разработке многодвигательных электроподвижных установок (ЭПУ) с индивидуальной тягой ведущих колес важное значение имеют исследование и оценка влияния способа управления импульсными преобразователями на энергетические и ходовые показатели установки в режиме импульсно-рекуперативного торможения тяговых двигателей (ТД)

Одной из характерных особенностей ЭПУ с индивидуальной тягой двух ведущих пневмоколес одной оси установки является неравенство угловых скоростей вращения двух ТД, возникающее из-за возможного неравенства динамических радиусов шин ведущих колес при движении ЭПУ по прямолинейной и криволинейной траекториям. К тому же в [1—3] доказано, что в двигательном режиме ТД оптимальным по минимуму потерь энергии в аккумуляторной батарее (АБ) законом несинфазного управления двумя импульсными преобразователями (ИП) является обеспечение временного сдвига между тактами работы двух ИП, равного половине периода импульсного цикла их работы.

Исходя из вышесказанного, исследование производится в случае неравенства скоростей вращения двух ТД постоянного тока, работающих в режиме импульсно-рекуперативного торможения со скважностью работы ИП, равной 0,5, и с учетом влияния зарядового состояния АБ. При этом принимаются следующие допущения: тристорно-импульсные преобразователи являются идеальными ключами; в течение периода коммутации преобразователей АБ представляет источник с постоянными значениями  $\mathcal{E}$ ,  $\mathcal{R}$  и внутреннего сопротивления; ТД идентичны по всем параметрам: пульсации скорости и магнитного потока ТД отсутствуют; приемка (аккумуляция) АБ в режиме зарядки при несинфазном и синфазном управлениях импульсно-рекуперативным торможением двух ТД происходит одинаково; циркуляция тока по электрическому контуру, образованному двумя ТД, отсутствует.

Схема замещения системы АБ—ИП—ТД приведена на рис. 1, где  $L_1$ ,  $R_1$ ,  $E_0$  — соответственно, индуктивность, активное сопротивление

и э. д. с. вращения ТД;  $R_u$ ,  $E$  — внутреннее сопротивление и э. д. с. АБ;  $D_{1,2}$  — обратные диоды, исключающие питания ТД от АБ и циркуляцию тока между ТД в режиме импульсно-рекуперативного торможения последних.

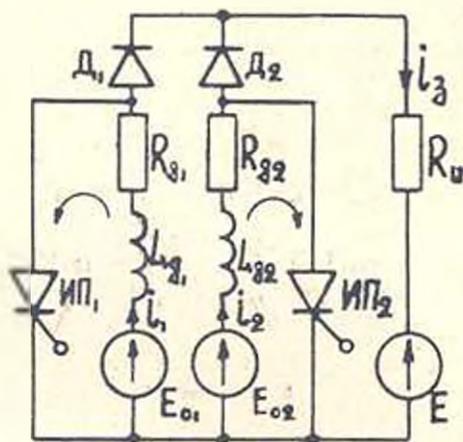


Рис. 1. Схема замещения системы АБ—ИП—ТД при импульсно-рекуперативном торможении ТД.

Введем систему относительных величин:

$$\bar{i} = \frac{iR_1}{E}; \quad g = \frac{R_u}{R_1}; \quad \beta = \frac{T}{T_1}; \quad T_1 = \frac{L_1}{R_1}; \quad e = \frac{E_0}{E}; \quad \tau = \frac{t}{T},$$

где  $i$  — ток,  $t$  — время,  $T$  — период коммутации импульсного инкла, одинаковый для обоих ИП.

При несинфазном управлении (НСУ) для обоих ТД имеют место два отдельных режима работы: самовозбуждения и рекуперации (при проводящем и непроводящем состоянии ИП соответствующего ТД).

Уравнения равновесия системы будут:

режим I — самовозбуждение:

$$L_1 \frac{di_{1,2}}{dt} + R_1 i_{1,2} = E_{01,2}; \quad (1)$$

режим II — рекуперация:

$$L_1 \frac{di_{1,2}}{dt} + (R_1 + R_u) i_{1,2} = E_{01,2} - E. \quad (2)$$

Постоянные интегрирования находятся по начальным условиям, исходя из непрерывности тока ТД. Решение уравнений (1), (2), соответственно, будет:

$$\bar{i}_{1,2} = e_{1,2} + A_{1,2} e^{-\beta \tau}; \quad (3)$$

$$i_{1,2} = \lambda_{1,2} + B_{1,2} e^{-(\beta+g)\tau - \beta \tau_0}, \quad (4)$$

где

$$i_{1,2} = \frac{e_{1,2} - 1}{1 + g}; \quad A_{1,2} = \frac{(1-h)(e_{1,2} - e_{1,2})}{1 - yh};$$

$$B_{1,2} = \frac{(1-y)(e_{1,2} - e_{1,2})}{1 - yh}; \quad v = e^{-2.5g}; \quad h = e^{-2.5g(1-g)}.$$

Разность средних значений токов ТД за период  $T$  для случая  $e_1 > e_2$  будет равна:

$$\Delta \bar{i}_{cp} = \bar{i}_{cp1} - \bar{i}_{cp2} = \frac{e_1 - e_2}{1 + g} \left[ \frac{2 + g}{2} - \frac{g^2(1-y)(1-h)}{2(1-yh)(1+g)} \right]. \quad (5)$$

Очевидно, что для оценки энергетической эффективности целесообразно рассмотреть случай  $e_1 = e_2 = e$  ( $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ). При этом среднее значение тока зарядки АБ при НСУ определяется как

$$\bar{i}_{z, cp} = \int_0^{0.5} \bar{i}_1^{II} dz + \int_0^{0.5} \bar{i}_2^{II} dz = \lambda + \frac{2B_1}{\beta} \cdot \frac{1-h}{1-g}, \quad (6)$$

где  $\bar{i}_1^{II}$ ,  $\bar{i}_2^{II}$  — токи ТД<sub>1</sub> и ТД<sub>2</sub> в режиме рекуперации.

Средние значения полезной (аккумуляированной)  $\bar{P}_n$  и полной  $\bar{P}$  мощностей (в относительных единицах) в режиме зарядки АБ, соответственно, будут равны:

$$\bar{P}_n = \frac{1}{0.5} \int_0^{0.5} E i_1 dz = \frac{E \cdot i_{z, cp}}{E^2 R_1} = \frac{i_{z, cp} \cdot R_2}{E} = \bar{i}_{z, cp}; \quad (7)$$

$$\bar{P} = \bar{P}_n + \frac{1}{0.5} \int_0^{0.5} \bar{i}_2^2 g dz = \frac{1}{0.5} \int_0^{0.5} (\bar{i}_1^2 + \bar{i}_2^2 g) dz. \quad (8)$$

где  $\bar{i}_1$ ,  $\bar{i}_{z, cp}$  — мгновенное и среднее значения тока зарядки в относительных единицах;  $E^2 R_1$  — базисная величина для выражения мощности в относительных единицах в удобной форме;  $i_1$ ,  $i_{z, cp}$  — мгновенное и среднее значения тока зарядки в абсолютных единицах.

К. п. д. режима зарядки АБ при НСУ с учетом (4), (6) — (8) будет:

$$\eta_{НСУ} = \frac{\lambda + \frac{2B_1}{\beta} \cdot \frac{1-h}{1-g}}{\lambda + \frac{2B_1}{\beta} \cdot \frac{1-h}{1+g} + g \left( \lambda^2 + \frac{4B_1}{\beta} \cdot \frac{1-h}{1-g} + \frac{B_1^2}{\beta} \cdot \frac{1-h^2}{1+g} \right)} \quad (9)$$

При синфазном управлении (СУ) имеют место два режима: I и II — одновременное самовозбуждение и рекуперация обоих ТД.

Аналогично вышеприведенному определяем разность средних значений токов ТД:

$$\Delta \bar{i}_{cp} = \bar{i}_{cp1} - i_{cp2} = (e_1 - e_2) \left( 1 + 2 \frac{1-y}{\beta} \right). \quad (10)$$

Мгновенное значение зарядного тока АБ при СУ и  $e_1 = e_2 = e$  в режиме со скважностью работы ИП  $\gamma = 0,5$  равно:

$$\bar{i}_3 = \bar{i}_1^0 + \bar{i}_2^0 = 2 \frac{e-1}{1+2g} + 2A_3 e^{-2(1+2g)\tau}, \quad (11)$$

где

$$A_3 = \frac{(1-y) |1 + g(e_1 + e_2)|}{(1+2g)(1-yf)}; \quad f = e^{-2(1+2g)\tau}.$$

При этом средние значения аккумулированной и полной мощностей зарядки определяются, соответственно:

$$\bar{P}_n = \int_0^{0,5} \bar{i}_3 d\tau; \quad (12)$$

$$\bar{P} = \int_0^{0,5} i_3 (1 + g\bar{i}_3) d\tau. \quad (13)$$

К. н. д. зарядки АБ при СУ определяется с учетом (11)–(13):

$$\eta_0 = \frac{i_{3,2} + \frac{2A_3}{\beta} \cdot \frac{1-f}{1+2g}}{i_{1,2} + \frac{2A_1}{\beta} \cdot \frac{1-f}{1+2g} + g \left( 2i_{1,2} + \frac{3i_{1,2}A_2}{\beta} \cdot \frac{1-f}{1+2g} + \frac{2A_2^2}{\beta} \cdot \frac{1-f}{1+2g} \right)}, \quad (14)$$

где  $i_{1,2} = \frac{e-1}{1+2g}$ .

Оценка энергетической эффективности НСУ по сравнению с СУ в режиме зарядки АБ производится с помощью отношения к. н. д.:

$$K_1 = \frac{\eta_{нсу}}{\eta_{су}}. \quad (15)$$

По выражениям (5), (10), (14), (15) на ЦВМ были рассчитаны основные зависимости при следующей вариации параметров:  $\beta = 0,1 \div 0,5$ ;  $g = 0,5 - 1,5$ ;  $e_1 = 1$  и  $e_2 = 0,5 - 1$ ;  $e_1 = 1,2$  и  $e_2 = 0,5 \div 1,2$ .

Результаты расчета показывают незначительное влияние частотного параметра  $\beta$  на к. н. д. и на разность токов ТД.

Из полученных результатов (рис. 2) следует, что в случае неравенства скоростей вращения ТД разность их токов при СУ намного больше, чем при НСУ. Наличие существенной разности токов ТД при СУ может привести к неблагоприятному перераспределению тормозных

моментов и сил между ведущими колесами и, тем самым, к ухудшению устойчивости и управляемости ЭПД в режиме торможения, поскольку в этом случае на колесо, вращающееся быстрее из-за неравенства динамических радиусов шин или же радиусов траектории движения, будет действовать относительно большее тормозное усилие.

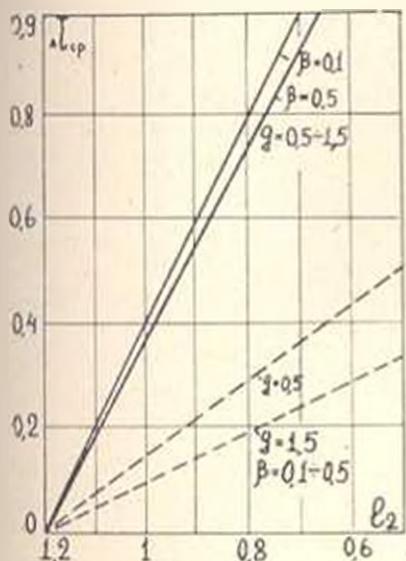


Рис. 2. --- HCV; — CV.

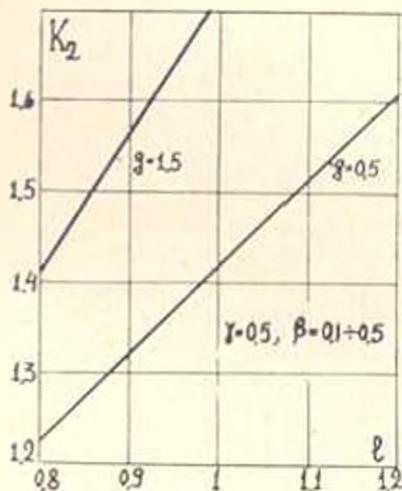


Рис. 3.

Из приведенной на рис. 3 зависимости следует, что в режиме импульсно-рекуперативного торможения ТД к.п.д. зарядки интенсивно возрастает.

Несинфазное управление двухдвигательным электроприводом в режиме импульсно-рекуперативного торможения ТД с автоматическим обеспечением оптимального сдвига между тактами работы двух ИП можно реализовать устройством [4], схема которого приведена на рис. 4.

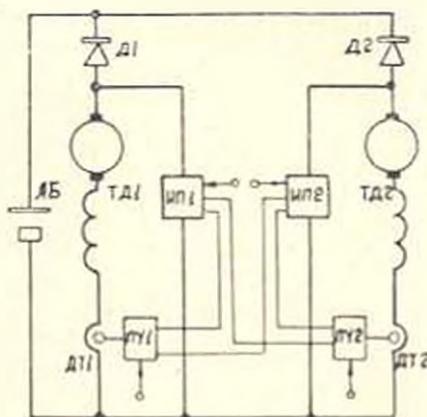


Рис. 4.

Полученные результаты подтверждают эффективность НСУ по энергетическим и ходовым показателям электроподвижных установок в режиме импульсно-рекуперативного торможения многодвигательного электропривода.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 18. I. 1979

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Бейнрович В. А., Сапожников Л. И.* Об оптимальном управлении системами с многофазной широтно-импульсной модуляцией. «Известия ТПИ», том 243, Томск, 1972.
2. *Варпетян В. С.* Исследование энергетической эффективности несинфазного управления импульсными преобразователями при питании от аккумуляторной батареи. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXVIII, № 3, 1975.
3. Исследование импульсно-управляемого электропривода автомобиля. Науч.-техн. отч. № 586, инв. № Б337323, ЕрПИ, Ереван, 1973.
4. *Варпетян В. С.* Устройство для рекуперативного торможения двухдвигательного привода. Автор. свид. № 650852.

## НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

А. А. ЧУБАЕВ

ФИЗИКА ОТКАЗОВ КАПИЛЛЯРНЫХ РТУТНО-  
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕЖИМЕ  
ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

В настоящее время электрохимические интеграторы достаточно широко применяются в измерительной технике, управлении, автоматическом регулировании. В ряде задач вышеуказанных областей наряду с накоплением информации выдвигается требование к ее хранению в течение коротких (часы, сутки) и длительных (недели, месяцы) промежутков времени. В этой связи большой интерес представляют капиллярные ртутно-электролитические элементы со считыванием по электропроводности межэлектродного зазора, имеющие модификации X450, X450-1, X450-2 [1, 2].

Элемент состоит из нескольких капилляров с впаиваемыми в их свободные концы платиновыми электродами. Другие концы капилляров открыты в общую камеру, образующую вместе с ними изолирующую герметическую оболочку, залитую электролитом. В камеру также вводится общий электрод, находящийся под ртутью, с помощью которого производится начальное заполнение капилляров ртутью, а в дальнейшем он может выполнять роль электрода считывания. Так как удельное сопротивление применяемого электролита почти на два порядка превышает удельное сопротивление ртути, то при электролитическом переносе ртути из одного капилляра в другой или с общего электрода в капилляр и, наоборот, соответственно, изменяется значение выходного сопротивления между любыми работающими электродами за счет изменения длины столбика электролита в капилляре [3]. Хранение информации в капиллярных ртутно-электролитических элементах осуществляется без подачи питающего напряжения, что является значительным преимуществом по сравнению со многими другими типами интеграторов.

С целью определения фактических значений показателей безотказности в режиме хранения информации проведены экспериментальные исследования на выборке объемом  $N = 80$  элементов в течение 5000 ч. В качестве критерия отказа взято невыполнение соотношения:

$$-R < \frac{\Delta z_{\text{н}}}{z_{\text{н}}} 100\% < K,$$

где  $K$  — наложенное ограничение на изменение импеданса считывания  $Z_{сч}$ , зависящее от функционального назначения;  $\Delta z_{сч}$  — изменение  $z_{сч}$ .

Испытания проводились без термостатирования образцов при изменении температуры от 5 до 35°C, после чего значение  $z_{сч}$  пересчитывалось по известной экспериментальной зависимости к 25°C.

В результате обработки экспериментальных данных с помощью критерия согласия Колмогорова установлено, что закон распределения времени безотказной работы в режиме хранения информации нормальный. Величина наработки на отказ при  $k = \pm 5\%$  равна для модификаций Х450, Х450-2 1100 ч.; для модификации Х450-1 — 5200 ч.

Рассматривая известную эквивалентную схему элементов [3], можно записать для импеданса считывания (параметра, определяющего потерю информации) следующее выражение:

$$dz_{сч} = \alpha dR_{сч} - \beta dC_{1в} - \gamma dC_{2в},$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — постоянные для данного элемента величины;  $R_{сч}$  — сопротивление электролита;  $C_{1в}$ ,  $C_{2в}$  — емкости двойного слоя электродов, включенных в цепь считывания.

Исследования показали, что причиной дрейфа  $z_{сч}$  являются изменения  $R_{сч}$  и  $C_{сч}$ . Рассмотрим физические явления и процессы, приводящие к этим изменениям.

Разная степень адсорбции на электродах ионов ртути и йода, содержащихся в электролите, приводит к экспериментально установленной колеблющейся разности потенциалов между ними, которая значительна между рабочими и считывающим электродами. Эта разность создает диффузные и миграционные потоки, вызывающие осаждение или растворение ртутных электродов и изменяющие геометрию межэлектродного зазора и  $R_{сч}$ . Суммарный поток равен:

$$\vec{j} = - \sum z_i F D_i \text{grad } C_i - \kappa \text{grad } \varphi,$$

где  $F$  — постоянная Фарадея;  $z_i$ ,  $D_i$ ,  $C_i$  — заряд, коэффициент диффузии и концентрация ионов  $i$ -того вида;  $\kappa$  — удельная электропроводность раствора;  $\varphi$  — электрический потенциал.

После заполнения элемента электролитом адсорбционное равновесие может устанавливаться многие часы вследствие того, что для металлов платиновой группы скорости адсорбции и обмена сравнительно небольшие [4]. Это приводит также к медленному установлению емкости двойного слоя, т. е. к изменению  $z_{сч}$ .

Колебания температуры будут влиять на величину  $C_{дв}$ , т. е. константа скорости десорбции  $k_{дв}$ , определяемая долей молекул  $i$ -того вещества, и отличие от константы скорости адсорбции  $k_{ад}$  зависит от температуры. Переменной является также константа равновесия адсорбции  $k_i$  [5].

Это сдвиг адсорбционного равновесия приведет к изменению адсорбционной части емкости двойного слоя  $C_{ад}$ .

Электродная система элемента представляет систему электростатических зарядов, взаимодействующих по закону Кулона, в связи с чем необходимо рассмотреть влияние изменения  $C_{21}$  на геометрию межэлектродного зазора.

Изменение емкости, так же как и потенциала электрода приведет к изменению заряда электрода:

$$dF = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon^2} d(q_1q_2).$$

Как известно:

$$dF = S \cdot dP, \text{ а } dP = -\frac{1}{\beta} \frac{dV}{V}$$

где  $\beta$  — термодинамический коэффициент сжимаемости, в нашем случае, ртути.

Можно записать, что

$$\frac{dV}{V} = -\frac{\beta}{4S\epsilon_0\epsilon^2} d(q_1q_2).$$

т. е. вариация силы кулоновского взаимодействия приводит к изменению объема ртутного столбика в капилляре, следовательно, и геометрии межэлектродного зазора.

Поскольку  $R_{21} = \frac{l}{\kappa S}$ , где  $l$  — длина столбика электролита;  $\kappa$  — электропроводность среды;  $S$  — площадь ртутного электрода, то изменение объема можно свести к изменению  $l$ ,  $S$  и  $R_{21}$ .

Проведя вышеуказанные преобразования, получим конечную формулу для изменения  $R_{21}$  в виде:

$$dR_{21} = A \left( \frac{C_{12}\varphi_1}{\varphi_2} d\varphi_{21} + \frac{C_{21}\varphi_2}{\varphi_1} d\varphi_{12} + C_{12}\varphi_1\varphi_2 dC_{12} + C_{21}\varphi_1\varphi_2 dC_{21} \right),$$

где  $A$  — постоянная данного элемента величина, определяемая геометрией зазора;  $\varphi_{21}$ ,  $\varphi_2$  и  $\varphi_{12}$ ,  $\varphi_1$  — потенциалы и поверхностные напряжения рабочего и считывающего электродов.

Можно сделать вывод, что причиной потери «памяти» является нестабильность электродов, вызванная неравнозначной и изменяющейся адсорбцией компонент электролита. Эта нестабильность имеет место как вследствие того, что существует энергетическая неоднородность поверхности платины (наличие на поверхности центров адсорбции с различной энергией связи), так и вследствие колебания адсорбционного равновесия при изменении температуры.

Проведенные исследования позволили предложить ряд новых технологических операций: прокалка, химическая очистка, предэлектролиз и амальгамирование электродов, приводящих к значительному увеличению их стабильности и поднятию нижнего значения наработки на отказ для X450, X450-2 и X450-1 до 15000 ч, и 20000 ч., соответственно.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Казарян А. В., Мкртычева А. А. Преобразователи измерительные, интегрирующие типа Х450, Х450/1, Х450/2. Информационный листок. Приборостроение, М., сер. 13—06, 1977.
2. Капиллярный ртутно-электролитический элемент. Информационный листок. Машприборинторг, М., 1976.
3. Шорыгин А. П. Электрохимические аналоговые запоминающие и адаптивные элементы. В кн. «Аналоговые—запоминающие и адаптивные элементы (под ред. Б. С. Сотского)», М., «Энергия», 1973.
4. Дамаскин Б. Б., Петрий О. А. Введение в электрохимическую кинетику. М., «Высшая школа», 1975.
5. Мельмедов И. М. Физические основы надежности, Л., «Энергия», 1970.

Ր Ո Վ Ա Ն Գ Ա Կ Ո Ւ Ք Յ Ո Ւ Ն

ՄԵՐՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

- Զ. Ա. Մանվելյան: Շփական նյութերի ռեոլոգիական հաստատունների ազդեցությունը ցածրաճան շարժման վրա նրանց որոշումը . . . . . 2
- Գ. Բ. Դավիդյան և Հ. Դոմբաևա: «Մետաղ-էպոքսիդային կոմպոսիցիոն ժայռակցված միացման մեջ թերլարվածության երևույթի հետազոտումը . . . . . 8

ԷԼԻՐԳԵՏԻՎԱ

- Լ. Հ. Հունեյան: Գազի փոխադրման օպտիմալ համակարգերի ընտրման մասին՝ հաշվի առնելով նրանց գործունեության հասարակությունը . . . . . 15

ՀԻՊՐՈՏԵՆՆԻՎԱ

- Ե. Հ. Խաչատրյան: Երկշերտ միջավայրում գրունտային ջրերի գծային դատալոգրված ջրհորերի հաշվարկը ինֆիլտրային սեղան հաշվառմամբ . . . . . 22

ՀԱՇՎՈՎԱԿԱՆ ՏՆԵՆՈՎԱ

- Ս. Վ. Լեոնով: Նշանային կորեկյատորների ճշգրտության որոշ բնութագրերը . . . . . 27

ՊԼՓՈՎԱԿԱՆ ՏՆԵՆՈՎԱ

- Վ. Ռ. Վալովայան: Դիզելային շարժիչներում ճնշումը գրանցող զերմակալուն հայտնիչներ 36
- Ս. Ն. Մալոսև, Հ. Հ. Միևոյան: Դեբրին որդաններում և նրանց պրոնկցիաններում ակա- 42  
սիվացնող կետերի հալտնարեման հարցի շուրջը . . . . .

ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՔԵՐ

- Վ. Ա. Վաբյետյան: Մարտկոցային էլեկտրաշարժական տեղակայանքների ընթաց- 47  
քային ու էներգետիկական բնութագրերը՝ քարշային էլեկտրաշարժիչների իմ-  
պուլսային-ոեկուպերատիվ արգելակման դեպքում . . . . .
- Ա. Ա. Զունեա: Ինֆորմացիայի պահպանման ոեժիմում սնդիկա-էլեկտրոլիտային մա- 53  
զանոթային էլեմենտների խափանման ֆիզիկան . . . . .

# СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Э. А. Манасян.* Влияние реологических констант фрикционных материалов па скачки при трении и их определение . . . . . 3
- Д. Б. Давидян, Н. А. Домбаева.* Исследование явления малостатической в стыковых соединениях металлов с оксидным компаундом . . . . . 8

## ЭНЕРГЕТИКА

- Л. А. Унянян.* О выборе оптимальных систем транспорта газа с учетом надежности их функционирования . . . . . 15

## ГИДРОТЕХНИКА

- Э. А. Хачатрян.* Расчет лишней воды водоабора подземных вод в двухслойной среде с учетом инфильтрационного питания . . . . . 21

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- О. В. Леонов.* Некоторые точностные характеристики знаковых корреляторов . . . . . 27

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- В. Р. Варданян.* Термостабильные датчики для регистрации давления в дизельном двигателе . . . . . 36
- А. Н. Мадоев, А. О. Минасян.* К вопросу обнаружения активирующих точек внутренних органов и их проекций . . . . . 42

## НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

- В. С. Варпетян.* Энергетические и ходовые показатели аккумуляторных электроподвижных установок при импульсно-рекуперативном торможении тяговых электродвигателей . . . . . 47
- Л. А. Чукаев.* Физика отказов капиллярных ртутно-электролитических элементов в режиме хранения информации . . . . . 51

