

ISSN 0002-306X

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՄԱՆ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

12

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

Журнал издается с 5. 1. 1949 г.

Выходит 6 раз в год на русском языке

Խ Ե Ր Ա Գ Բ Ա Կ Ա Ն Կ Ա (Ե Գ Ի Ա

Ռ. Մ. Գաբրիելյան (պատասխանատու խմբագիր), Վ. Վ. Ալեքեևսկի:

Ռ. Չ. Երզնե, Ռ. Ա. Ղազարյան, Ա. Մ. Ղազարյան, Մ. Վ. Կասյան:

Ա. Հ. Մանուկյան, Յու. Լ. Սուրգյան, Մ. Գ. Ստալյան (պատ. խմբ. տեղ.):

Զ. Կ. Սեֆրեյան (պատասխանատու քարտուղար), Վ. Ս. Խաչատրյան:

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р. М. Мартиросян (ответственный редактор), В. В. Алексеевский,

Р. В. Атоян, Р. А. Казарян, С. М. Казарян, М. В. Касьян,

А. О. Сажян, Ю. Л. Саркисян, М. Г. Сталян (зам. ответ. редактора),

Э. К. Степанян (ответственный секретарь), В. С. Хачатрян.

© Издательство АН Армении.

Известия АН Армении (серия техн. наук), 1960

УДК 621.01

В. Г. АРАКЕЛЯН, К. Д. АВЕТИСЯН

ДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕХАНИЗМОВ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ И УСЛОВИЮ УРАВНОВЕШИВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ФУНДАМЕНТ

Разработан метод динамического синтеза механизмов, являющийся симбиозом двух известных задач синтеза механизмов по коэффициенту неравномерности движения и условию уравновешивания динамических нагрузок на фундамент. Реализация условия синтеза осуществляется несимметричной установкой маховой массы на звене привода, что позволяет не только обеспечить требуемую неравномерность движения механизма, но и его наилучшую равномерную уравновешенность на фундаменте. Предложенный метод синтеза позволяет обеспечивать малую металлоемкость, компактность, конструктивную простоту и надежность проектируемых механизмов.

Ил. 1. Библиогр.: 1 назв.

Մշակվել է մեխանիզմների դինամիկական համադրման մեթոդ, որը հանդիսանում է երկու հայտնի խնդիրների համակցություն՝ մեխանիզմների համադրում ըստ շարժման անհավասարաչափության գործակցի և հիմքի վրա մեխանիզմի դինամիկ բեռնվածությունների հավասարակշռման պայմանի: Համադրման պայմանների իրականացումը իրագործվում է բեռման զգալի վրա՝ Բաֆանիֆային զանգվածի անհամաչափ տեղադրմամբ, որը թույլ է տալիս ոչ միայն ապահովել մեխանիզմի շարժման պահանջվող անհավասարաչափությունը, այլ նաև նրա լավագույնը: Ավաստարազի հավասարակշռությունը հիմքի վրա:

Համադրման տեսչարկված մեթոդը թույլ է տալիս ապահովել նախազեղող մեխանիզմների ցածր մետաղատարություն և ամփոփություն, կոոնստրուկտիվ պարզություն և հուսալիություն:

Проектирование современных машин требует создания оптимальных методов синтеза, позволяющих наряду с достижением улучшенных динамических свойств механизмов обеспечить их малую металлоемкость и компактность, конструктивную простоту и надежность. Одним из путей решения этой задачи — разработка новых методов синтеза, являющихся симбиозом ранее известных и достаточно хорошо изученных методов. Так, например, известная задача обеспечения требуемой неравномерности движения механизма решается посредством увеличения момента инерции входного звена (звена привода) путем добавления маховой массы [1, 2]. Другая, широко применяемая в современной технике задача уравновешивания механизмов на фундаменте, также решается добавлением корректирующей массы на входном звене [3, 4]. Таким образом получается, что в обоих случаях улучшение динамических характеристик механизма достигается увеличением массы входного звена. При этом синтезируемые параметры связываются между собой свободно выбираемыми параметрами, что указывает на возможность объединения двух этих методов.

Задачу, которая рассмотрена в данной работе, можно сформулировать так: разработать способ установки маховой массы, обеспечивающей не только требуемый коэффициент неравномерности вращения входного звена механизма, но и минимизацию динамических нагрузок на фундамент.

Колесания скорости входного звена механизма описывается коэффициентом неравномерности движения

$$\delta = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / \omega_{\text{ср}},$$

где ω_{\max} и ω_{\min} — максимальное и минимальное значения угловой скорости входного звена за цикл, $\omega_{\text{ср}}$ — средняя угловая скорость за цикл.

Практикой установлены те значения δ , которые допустимы в различных случаях. Уменьшение коэффициента δ достигается путем установки на валу входного звена механизма маховика, момент инерции которого определяется по следующей известной формуле [1]:

$$I_{M(O)} = A / \omega_{\text{ср}}^2 \delta - I_0 - (I_{\text{пр}}^{\max} (1 + \delta) + I_{\text{пр}}^{\min} (1 - \delta)) / 2\delta, \quad (1)$$

где A — разность работ движущих сил и сил сопротивления, I_0 — момент инерции входного звена, $I_{\text{пр}}^{\max}$ и $I_{\text{пр}}^{\min}$ — приведенные моменты инерции звеньев механизма, соответствующие максимальному ω_{\max} и минимальному ω_{\min} значениям угловой скорости входного звена.

Наилучшее равномерное уравнивание плоских механизмов [3] осуществляется размещением на входном звене корректирующей массы, величина которой определяется из условия

$$\max_{\varphi \in [0, 2\pi]} |\bar{P}_u - \bar{P}(\varphi)| \rightarrow \min, \quad m_k, \alpha_k$$

где \bar{P}_u — сила инерции корректирующей массы, $\bar{P}(\varphi)$ — главный вектор неуравновешенных сил, m_k и α_k — корректирующая масса и ее угол размещения.

Статический момент корректирующей массы относительно оси вращения входного звена представляется в виде

$$S = m_k r_k = f(m_i, l_i, r_i, P_{\text{ис}}), \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где m_i , l_i и r_i — масса, длина и координата центра масс i -го звена механизма, $P_{\text{ис}}$ — сила полезного сопротивления, n — число подвижных звеньев механизма.

Предположим, что маховик имеет массу, равную корректирующей массе ($m_M = m_k$), и установлен на валу входного звена несимметрично, с некоторым эксцентриситетом e (рис.).

В этом случае условия (1) и (2) можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} I_{M(O)} = I_{M(S)} + m_M e^2, \\ m_M e = S. \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая, что с целью получения необходимого момента инерции при возможно малой массе m_M и диаметре D_M (рис.) маховик выполняют в виде тяжелого обода, соединенного со втулкой тонким диском. момент инерции маховика можно представить в виде $I_{M(O)} = m_M D_M^2 / 4$ [2]. Подставляя это значение момента инерции маховика в систему уравнений (3) и разрешив ее относительно массы маховика, получим

$$m_M = \frac{I_{M(O)} + \sqrt{I_{M(O)}^2 - D_M^2 S^2}}{D_M^2 / 2}. \quad (4)$$

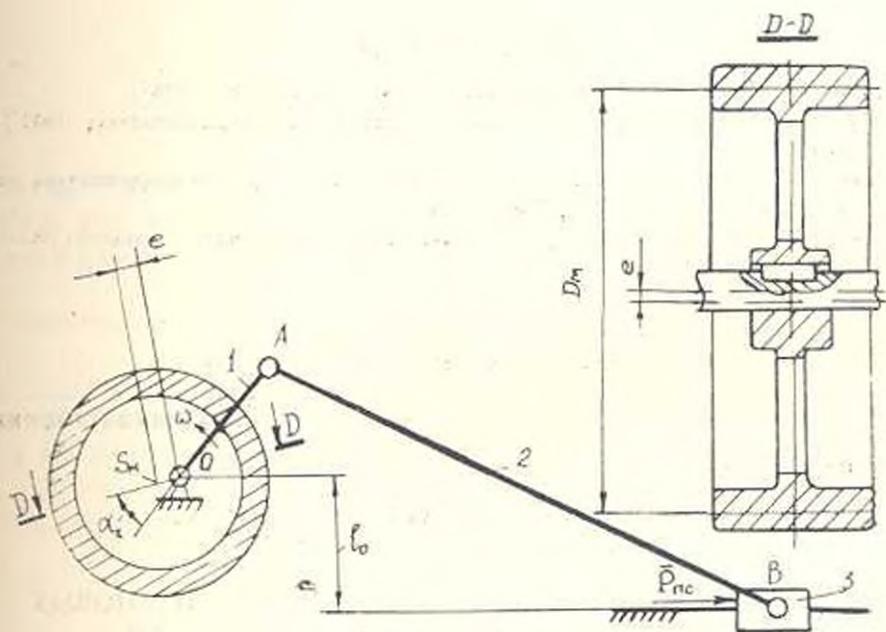


Рис.

Второе решение квадратного уравнения может привести к неконструктивным (нереализуемым) параметрам маховика, поэтому ограничимся рассмотрением лишь одного корня. Диаметр D_M маховика выбирается по конструктивным соображениям с учетом условия $D_M < I_{M(O)} / S$. После определения массы маховика определяется расстояние e от оси симметрии маховика до оси его вращения. Нетрудно убедиться в том, что при отсутствии необходимости в уравновешивании механизма (т.е. при $e = 0$) выражение (4) для определения массы маховика принимает следующую известную форму [1, 2]: $m_M = I_{M(O)} / D_M^2$. Таким образом, разработанный метод динамического синтеза позволяет с помощью несимметричной установки маховика обеспечить не только требуемую неравномерность движения механизма, но и уравновешенность на фундаменте.

Пример. При заданных размерах: $l_{O_1A} = 0,1$ м, $l_{A_1B} = 0,2$ м, $l_O = 0$; массах $m_1 = 0,8$ кг, $m_2 = 2,3$ кг, $m_3 = 3,1$ кг; координатах центров масс $l_{O_1S_1} = 0,05$ м, $l_{A_1S_2} = 0,1$ м, $l_{B_1S_3} = 0$; моментах инерции $I_{O_1} = 0,003$ кг·м², $I_{A_1} = 0,013$ кг·м², $I_{B_1} = 0,03$ кг·м²; силы полезного сопротивления $P_{uz} = 100$ Н и средней угловой скорости входного звена $\omega_{ср} = 15$ с⁻¹ кривошипно-ползунного механизма спроектировать маховик, обеспечивающий коэффициент неравномерности движения $|\delta| = 1,5$ и наилучшую равномерную уравновешенность механизма. По предложенной методике выбирая $l_{O_1M} = 0,2$ м, определяем: $m_M = 21,5$ кг, $e = 0,01$ м, $\varphi_k = 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский И. И. Теория механизмов.— М.: Наука, 1967.— 776 с.
2. Баранов Г. Г. Курс теории механизмов и машин.— М.: Машиностроение, 1967.— 508 с.
3. Гервилиц Я. Л. О применении методов Чебышева к задаче уравновешивания механизмов.— М.—Л.: ОГНЗ, 1948.— 148 с.
4. Гервилиц Я. Л. Динамический синтез механизмов по Чебышеву.— Харьков: Изд-во ХГУ, 1958.— 134 с.

Нав. АН Армении (сер. ТН), т. МLIH, № 5, 1990, с.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.10:621.762

Г. Л. ПЕТРОСЯН, В. Г. СААКЯН, Г. В. МУСАЕЛЯН,
К. Н. ЭДЛИЯН, А. О. СИМОНЯН

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОЛСТОСТЕННЫХ ТИТАНОВЫХ ФИЛЬТРОВ ПО ДОПУСКАЕМЫМ НАГРУЗКАМ

Предложен численный метод определения предельного давления толстостенных титановых фильтров. Используются зависимости теории пластичности реальных пористых материалов. Приведен анализ данных для различных толщин и пористостей толстостенных титановых фильтров.

Ил. 3. Библиогр. 3 назв.

Մտարդիված է ճանաչողական տիպան Ֆիլտրերի իրարմարմիկ նշման որոշման թվային մեթոդը Օգտագործված է իրական ծախսով և կոնստրուկտիվային տեսության բանաձևերը թերթիմ է արդրեթ ճանաչողականները և ծախսով ներմարմիկ ճանաչողական տիպան Ֆիլտրերի տեսման նշման սվայրները վերլուծությունը:

В работе [1] используется метод конечных элементов для исследования процесса пластического деформирования толстостенных бесконечно длинных спеченных труб, нагруженных радиальным давлением. Следует отметить, что это решение не охватывает все практически важные случаи пластического деформирования толстостенных спеченных труб.

Пример. При заданных размерах: $l_{O_1A} = 0,1$ м, $l_{A_1B} = 0,2$ м, $l_O = 0$; массах $m_1 = 0,8$ кг, $m_2 = 2,3$ кг, $m_3 = 3,1$ кг; координатах центров масс $l_{O_1S_1} = 0,05$ м, $l_{A_1S_2} = 0,1$ м, $l_{B_1S_3} = 0$; моментах инерции $I_{O_1} = 0,003$ кг·м², $I_{A_1} = 0,013$ кг·м², $I_{B_1} = 0,03$ кг·м²; силы полезного сопротивления $P_{uz} = 100$ Н и средней угловой скорости входного звена $\omega_{ср} = 15$ с⁻¹ кривошипно-ползунного механизма спроектировать маховик, обеспечивающий коэффициент неравномерности движения $|\delta| = 1,5$ и наилучшую равномерную уравновешенность механизма. По предложенной методике выбирая $l_{O_1M} = 0,2$ м, определяем: $m_M = 21,5$ кг, $e = 0,01$ м, $\varphi_k = 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский И. И. Теория механизмов.— М.: Наука, 1967.— 776 с.
2. Баранов Г. Г. Курс теории механизмов и машин.— М.: Машиностроение, 1967.— 508 с.
3. Гервилиц Я. Л. О применении методов Чебышева к задаче уравновешивания механизмов.— М.—Л.: ОГНЗ, 1948.— 148 с.
4. Гервилиц Я. Л. Динамический синтез механизмов по Чебышеву.— Харьков: Изд-во ХГУ, 1958.— 134 с.

Нав. АН Армении (сер. ТН), т. МЛIII, № 5, 1990, с.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.10:621.762

Г. Л. ПЕТРОСЯН, В. Г. СААКЯН, Г. В. МУСАЕЛЯН,
К. Н. ЭДЛИЯН, А. О. СИМОНЯН

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОЛСТОСТЕННЫХ ТИТАНОВЫХ ФИЛЬТРОВ ПО ДОПУСКАЕМЫМ НАГРУЗКАМ

Предложен численный метод определения предельного давления толстостенных титановых фильтров. Используются зависимости теории пластичности реальных пористых материалов. Приведен анализ данных для различных толщин и пористостей толстостенных титановых фильтров.

Ил. 3. Библиогр. 3 назв.

Մտարդիված է ճանաչողական տիպան Ֆիլտրերի իրարարելի նշման որոշման թվային մեթոդ ճշտագործիված է իրական թափանցելի կոնիկերի պլաստիկության տեսության բանաձևերի վերջում է արդեն ճանաչողությունները և թափանցելիության ճանաչողական տիպան Ֆիլտրերի տանանային նշման սվյալները վերլուծությունը:

В работе [1] используется метод конечных элементов для исследования процесса пластического деформирования толстостенных бесконечно длинных сеченных труб, нагруженных радиальным давлением. Следует отметить, что это решение не охватывает все практически важные случаи пластического деформирования толстостенных сеченных труб.

Целью настоящей работы являются исследование предельного состояния толстостенных фильтров из неупрочняемого титана при отсутствии осевых напряжений и выявление особенностей расчета спеченных труб по допускаемым нагрузкам. Для этого используем следующие зависимости теории пластичности реальных пористых материалов [2]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\beta^{n+0,5}} \left[\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} + 9\alpha^m \sigma_0^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3d\varepsilon_{\text{экв}}}{2\sigma_{\text{экв}} \beta^{2m}} [\tau_{ij} - (1 - 2\alpha^m) \delta_{ij} \sigma_0], \quad (2)$$

$$dv = \frac{9\alpha^m (1 - \nu) d\varepsilon_{\text{экв}} \tau_r}{\beta^{2m} \sigma_{\text{экв}}}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\nu}{2(1 - \nu)}, \quad \beta = (1 - \nu)^2, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ — эквивалентное напряжение, $d\varepsilon_{\text{экв}}$ — эквивалентное приращение пластической деформации, $d\varepsilon_{ij}$ — компоненты тензора приращений пластических деформаций, S_{ij} , τ_{ij} — компоненты девиаторов и тензоров напряжений, $\tau_r = \frac{\delta_{ij} \tau_{ij}}{3}$ — среднее напряжение, $d\varepsilon_r = \frac{\delta_{ij} d\varepsilon_{ij}}{3}$ — приращение средней деформации, δ_{ij} — символ Кронекера, α и β — функции пористости, m и n — параметры пористости.

Условие возникновения пластической деформации реальных пористых материалов имеет вид [2]

$$\frac{1}{\beta^{n+0,5}} \left[\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} + 9\alpha^m \sigma_0^2 \right]^{1/2} = \sigma_*, \quad (5)$$

где σ_* — предел текучести вещества пористого материала при одноосном напряженном состоянии, который является различным для разных пористых материалов и выражается через начальную пористость v_0 и предел текучести компактного материала $(\sigma_r)_k$ следующей зависимостью:

$$\sigma_* = \frac{1 - \alpha^m (1 - \nu)^{2,5}}{\beta^{n+0,5}} (\sigma_r)_k, \quad (6)$$

где α_0 , β_0 — значения функций пористости α , β при $\nu = v_0$.

Для решения вышеуказанной задачи рассматривается толстостенная пористая труба с внутренним радиусом a , наружным — b , нагруженная внутренним давлением p . Принимается, что осевые напряжения отсутствуют: $\sigma_z = 0$. Уравнения равновесия и совместности деформаций для элемента толстостенной трубы имеют вид

$$d\tau_r = \frac{dr}{r} (\tau_k - \tau_r), \quad (7)$$

$$r \frac{d\varepsilon_3}{dr} = \varepsilon_r - \varepsilon_3, \quad (8)$$

где z — текущий радиус трубы.

Из уравнения (1) с учетом условия $z = 0$ получаем

$$\varepsilon_{\text{вн}} = \frac{1}{\sigma^m - 0.5} \sqrt{\sigma_r^2 (1 + 2\alpha^m) - \sigma_r \sigma_0 (1 - 2\alpha^m) + \sigma_0^2 (1 + 2\alpha^m)}. \quad (9)$$

Решая уравнение (9) относительно σ_r , находим

$$\sigma_r = \frac{\sigma_0 (1 - 2\alpha^m) + 1 \sqrt{4(1 + \alpha^m) \sigma_{\text{вн}}^2 \sigma_0^{2m-2} - 3\sigma_0^2 (1 + 4\alpha^m)}}{2(1 + \alpha^m)}. \quad (10)$$

В расчетах используются следующие данные механических характеристик материала: $(\sigma_0)_p = 315$ МПа, $m = 1.4$, $n = 0.56$. Численное решение задачи с учетом граничных условий начинается с наружного слоя трубы, где радиальное напряжение равно нулю ($\sigma_r = 0$). Напряжение σ_0 определяется из уравнения (10) при $v = v_0$. По формулам (4) определяются α_0 и β_0 , а по (6) — ε_0 .

Так как по условию задачи пластическая деформация только что достигла наружного слоя (нулевая точка), то для этого слоя компоненты деформаций ε_r и ε_3 можно определить из зависимостей обобщенного закона Гука, в котором используются модуль упругости первого рода E_0 и коэффициент поперечной деформации пористого материала ν_0 , зависящие от пористости: $E_0 = E(1 - \nu)^{2.5}$, $\nu_0 = \nu(1 - \nu)^{0.5}$. Здесь E , ν — модуль упругости первого рода и коэффициент поперечной деформации вещества спеченного материала. Для титана принимаем $E = 1.1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.32$.

После определения компонентов напряженно-деформированного состояния наружных точек толстостенного фильтра для получения данных первой точки (первый шаг вовнутрь фильтра) задается малая величина эквивалентного приращения пластических деформаций (для всех шагов принимается $\Delta\varepsilon_{\text{вн}} = 0.0001$) и по известным величинам компонентов напряжений σ_{r0} , пористости v_0 , соответствующих значений α_0 и β_0 , согласно (2) определяются $d\varepsilon_3$ и $d\varepsilon_r$. Уравнение (8) позволяет определить $d\varepsilon_r$. Радиус данного слоя определяется выражением $r = b + dr$. Приращение радиального напряжения $d\varepsilon_r$ находится из уравнения (7), а приращение пористости dv_0 — из (3). Для определения σ_{r1} , v_1 , ε_{r1} и ε_{31} используются следующие зависимости: $\sigma_{r1} = \sigma_{r0} + d\varepsilon_r$, $v_1 = v_0 + dv_0$, $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r0} + d\varepsilon_r$, $\varepsilon_{31} = \varepsilon_{30} + d\varepsilon_3$. Значения напряжений σ_0 для первой точки устанавливаем из формулы (10).

Найденные значения компонентов напряженно-деформированного состояния и пористости для первой точки, вышеприведенные уравнения и алгоритм вычислений позволяют повторить цикл и для второй точки и определить новые α , β (формулы 4), $d\varepsilon_r$, $d\varepsilon_3$ (2), dr (8),

$r_2 = r_1 + dr_1$, $d\sigma_{r_1}$ (7), dv_0 (3), $\sigma_{r_1} = \sigma_{r_1} + d\sigma_{r_1}$, $\sigma_z = v_1 + dv_1$, $\sigma_{r_1} = \epsilon_{r_1} + d\epsilon_{r_1}$, $\epsilon_{\theta_1} = \epsilon_{\theta_1} + d\epsilon_{\theta_1}$ и σ_{θ_1} (10). Цикл расчета повторяется до тех пор, пока r не сравняется с внутренним радиусом a .

Таким образом, постепенным перемещением вовнутрь толстостенного фильтра получается распределение компонентов напряженно-деформированного состояния по толщине фильтра и устанавливается предельное давление фильтра $p_{пр} = \sigma_{r_{a_2}}$ ($\sigma_{r_{a_2}}$ — величина σ_r во внутреннем слое при $r = a$).

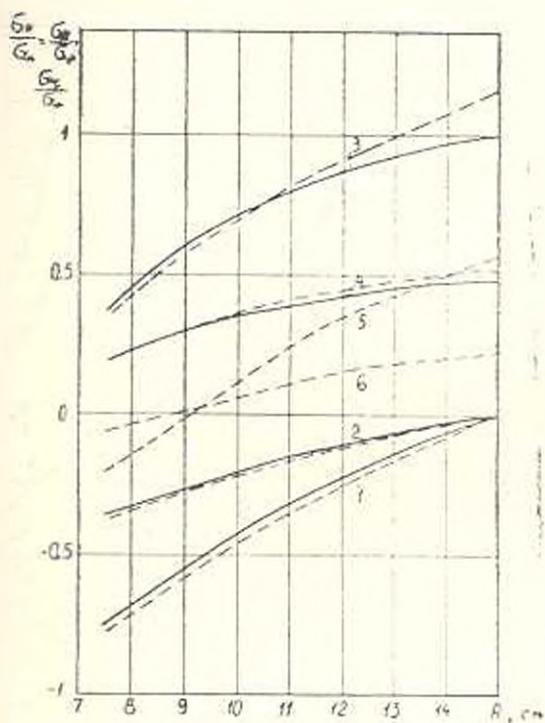
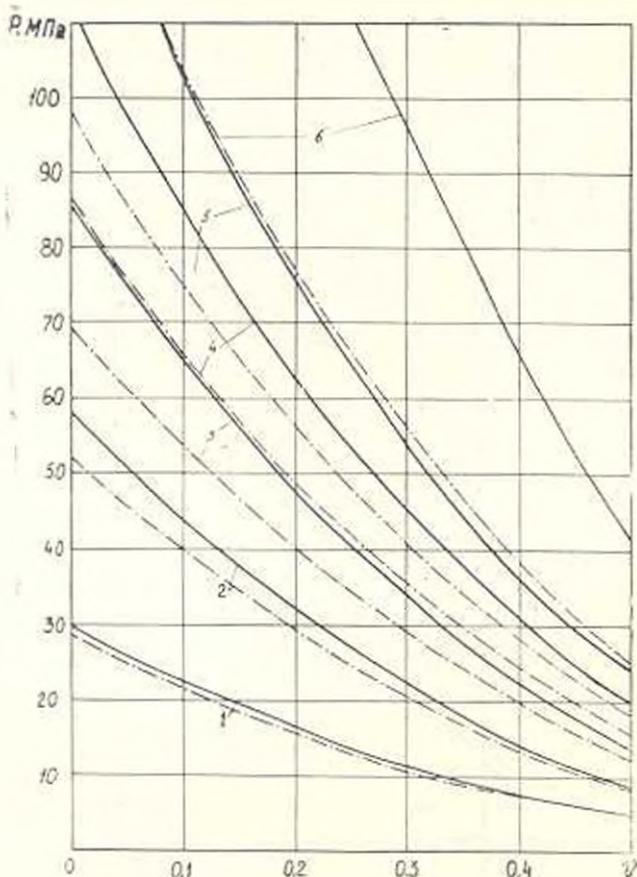


Рис. 1. Эпюры напряжений в толстостенном титановом фильтре: 1, 3, 5 — при $v_0 = 0,0005$, 2, 4, 6 — при $v_0 = 0,2$.

На рис. 1 сплошными линиями показаны эпюры распределения радиальных σ_r (1, 2) и окружных σ_θ (3, 4) напряжений по толщине фильтра для начальных пористостей материала $v_0 = 0,0005$ (беспористый) и $v_0 = 0,2$ при $k = 2$. Штриховые линии соответствуют случаю отсутствия осевой деформации фильтра $\sigma_z = 0$ ($\sigma_z \neq 0$). Линии 5 и 6 показывают распределения осевых напряжений σ_z . Сравнение данных рис. 1 показывает, во-первых, что величина начальной пористости материала оказывает существенное влияние на компоненты напряженного состояния толстостенного фильтра и, во-вторых, что для случаев $\sigma_z = 0$ и $\sigma_z \neq 0$ напряжения σ_r почти совпадают, а окружные σ_θ (кривые 3, 4) и осевые σ_z (5, 6) напряжения в наибольшей степени отличаются по величине в точках наружного слоя фильтра.

При этом с увеличением пористости материала это расхождение уменьшается. Следует отметить, что характер распределения напряжений для беспористого материала совпадает с результатами решения, приведенного в [3].



Диаграммы $p - v$ для различных k . Кривая 1 при $k = 1,1$, 2 — $k = 1,2$, 3 — $k = 1,3$, 4 — $k = 1,4$, 5 — $k = 1,5$, 6 — $k = 2$.

На рис. 2 сплошными линиями показаны графики зависимостей между предельным давлением $P_{\text{пл}}$ и пористостью материала для различных k . Штрих-пунктирные линии соответствуют расчету по допускаемым напряжениям при $\sigma_r = 0$, где допускаемое внутреннее давление с использованием формул Ламе и условия (5) определяется следующей формулой:

$$P = \frac{(k^2 - 1) \bar{\sigma}^{0,5}}{1 + 4a^m + 3k^4} \bar{\sigma}.$$

При этом предполагается, что пластическая деформация возникает только в опасной (внутренней) точке фильтра.

Анализ кривых рис. 2 показывает, что расчеты по допускаемым нагрузкам дают большие значения предельных давлений. Несмотря на

то, что кривые рис. 2 достаточно наглядно показывают влияние пористости материала ε и размеров фильтра k на величину предельного давления, для практических целей целесообразным является на основании этих данных построить также кривые изменения $k-\sigma$ для различных внутренних давлений p (рис. 3). Кривые 1—13 соответствуют

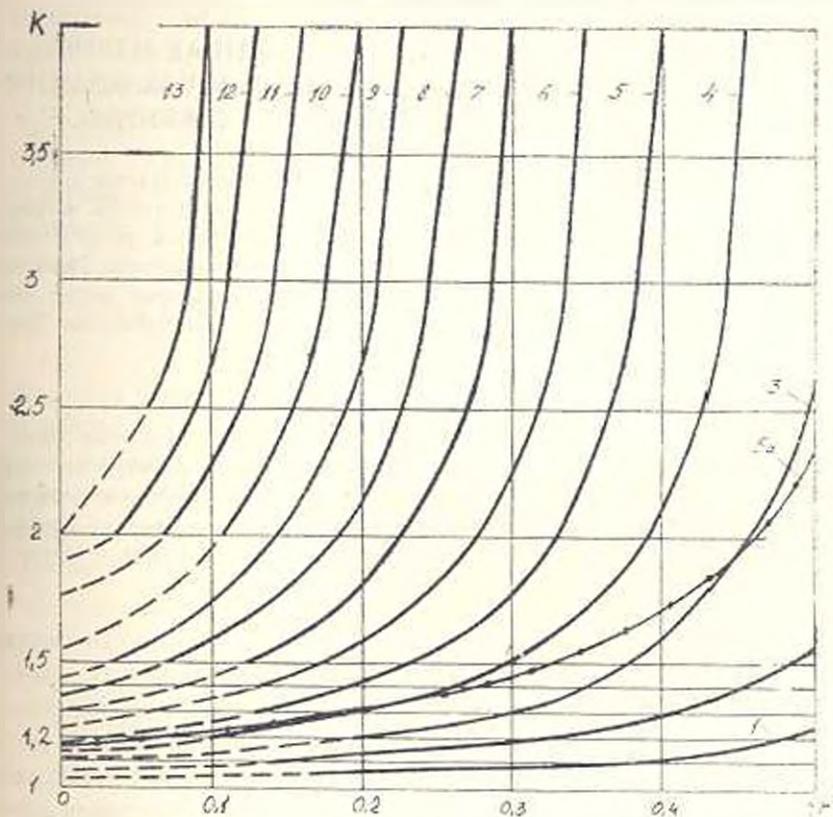


Рис. 3. Диаграммы $k-\sigma$ для различных p_0 .

расчетам по допускаемым напряжениям для различных внутренних давлений p (от 10 до 130 МПа). Кривая 5а, обозначенная точками, соответствует расчетам по допускаемым нагрузкам при $p_{np} = 50$ МПа. Сравнение кривых 5 и 5а показывает, что для заданного предельного давления (в данном случае 50 МПа) расчет по допускаемым нагрузкам даст меньшую толщину фильтра и, следовательно, экономную материалу, необходимого для его изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сердюк Г. Г., Михайлов О. В. Математическое моделирование пластического деформирования порошковых материалов при наличии свободной поверхности // Порошковая металлургия.— 1986. № 4.— С. 18—22.
2. Петросян Г. Л. Пластическое деформирование порошковых материалов.— М.: Металлургия, 1988.— 153 с.
3. Маджид Н. И. Прикладная теория пластичности и ползучести.— М.: Машиностроение, 1975.— 399 с.

УДК 624.072.333.032.7+699.811

Р. О. САМЯН, Ю. Х. ГАЗАРЯН, Э. С. САРКИСЯН

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПЕРИОДОВ СВОБОДНЫХ ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ СТВОЛЬНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

Излагается методика определения динамических характеристик многоэтажных каркасных зданий ствольной конструктивной системы с учетом изгибно-крутильных колебаний. Составлена программа на ЭВМ и выполнены расчеты применительно к 3-этажным зданиям при различных значениях эксцентриситета. Исследование показало, что экспериментальные и расчетные значения собственных частот изгибно-крутильных колебаний здания практически совпадают, что подтверждает приемлемость разработанной методики.

Ил. 2. Табл. 1. Библиогр. 2 назв.

Դադարձված և լուծված է բազմաշարի շենքերի համասեղ ծածան և ոլորման ազատ տատանումների զիջերենցիալ հափառումների համակարգը: ԷՃՄ-ով կատարված են ճաշարհիներ 3 շարիանի շենքերի նստար: Հետազոտությունը ընդլայ է ստացիա, որ ճաշարհային և փորձարարական եղանակներով որոշված ազատ տատանումների համախառնումները կապեն իրարից շեն տարրերիում, ուստի առաջադրված ճաշարհային եղանակը կարելի է կիրառել ներված շենքերի նախադժման ընթացքում:

Целью настоящей работы является разработка методики определения динамических характеристик многоэтажных каркасных зданий с ядрами жесткости и целыми на этаж плитами перекрытий, возводимыми методом подъема при несовпадении их центров масс и жесткостей с учетом изгибно-крутильных колебаний. В расчетах принимается, что масса здания равномерно распределена по высоте и плану здания, ядро жесткости рассматривается как консольный брус, жестко заделанный в основание; плиты перекрытий в своей плоскости считаются жесткими, а контур сечения ядра принимается неизменяемым. В расчетах сдвиговыми деформациями ядра, податливостью основания, а также сдвиговой жесткостью каркаса, что характерно для многоэтажных зданий, возводимых методом подъема, пренебрегаются.

С учетом принятых исходных предпосылок дифференциальные уравнения собственных изгибно-крутильных колебаний многоэтажных каркасных зданий с ядром жесткости для случая, когда эксцентриситет находится в плоскости симметрии (рис. 1), имеют следующий вид:

$$EI_T \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - m \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 0,$$

$$m \alpha \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - GI_a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - m r^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где y — перемещение центра жесткости ядра в направлении оси ou ; θ — угол поворота сечения ядра жесткости; E, G — начальные модули упругости и сдвига материала ядра; I_x — момент инерции ядра относительно оси ox (рис. 1); m — погонная масса здания (масса, приходящаяся на единицу высоты здания); a — расстояние между центрами жесткости и тяжести (эксцентриситет), постоянное по высоте здания; I_s — крутильный момент инерции системы; r — радиус инерции плана здания.

Величина r определяется из выражения

$$r^2 = \frac{I_{x, n} + I_{y, n}}{F_n} + a^2 \quad (2)$$

где $I_{y, n}, I_{x, n}$ — соответственно моменты инерции плана здания относительно главных осей, т. е. осей, проходящих через центр масс и параллельных осям ox и ou (рис. 1); F_n — площадь плана здания.

Решение системы (1) ищем в виде

$$y(z, t) = Y(z) T(t), \quad (3)$$

$$\theta(z, t) = \Theta(z) T(t).$$

где $Y(z), \Theta(z)$ — координаты форм (перемещения и углы поворотов), т. е. функции, зависящие только от параметра z и определяющие нормальную форму колебания; $T(t)$ — функции времени.

После подстановки (3) в систему уравнений (1) и разделения переменных для координат форм колебаний $Y(z)$ и $\Theta(z)$ получаем

$$Y(\xi) = A_1 \operatorname{ch} \lambda_1 \xi + A_2 \operatorname{sh} \lambda_1 \xi + A_3 \cos \lambda_2 \xi + A_4 \sin \lambda_2 \xi + A_5 \cos \lambda_3 \xi + A_6 \sin \lambda_3 \xi, \quad (4)$$

$$\Theta(\xi) = \frac{1}{ae_1 \omega^2} \{ (e_1 \omega^2 - \lambda_1^2) (A_1 \operatorname{ch} \lambda_1 \xi - A_2 \operatorname{sh} \lambda_1 \xi) + (e_1 \omega^2 - \lambda_2^2) (A_3 \cos \lambda_2 \xi + A_4 \sin \lambda_2 \xi) + (e_1 \omega^2 - \lambda_3^2) (A_5 \cos \lambda_3 \xi + A_6 \sin \lambda_3 \xi) \}, \quad (5)$$

$$e_1 = \frac{mH^4}{EI_s}, \quad e_2 = \frac{mH^2}{GI_s}$$

где $\xi = \frac{z}{H}$ — безразмерная величина; H — высота здания, ω — соб-

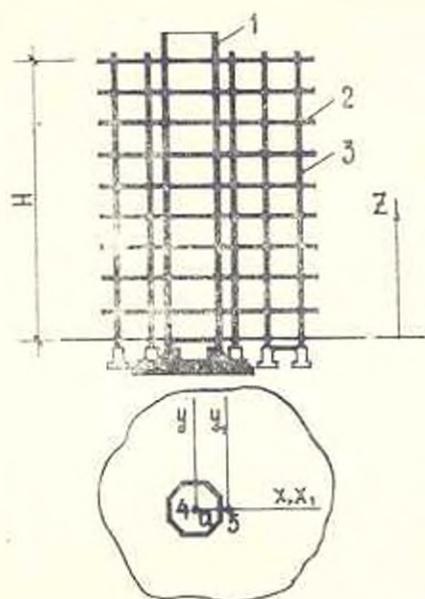


Рис. 1. Конструктивная схема многоэтажного здания ствольной системы: 1 — ядро жесткости 2 — плиты перекрытия, 3 — колонны, 4 — центр жесткости 5 — центр масс.

ственная круговая изгибно-крутильная частота системы. $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — корни характеристического уравнения системы, которое имеет вид

$$\lambda^6 + e_2 r^2 \omega^2 \lambda^4 - e_1 \omega^2 \lambda^2 + (a^2 - r^2) e_1 e_2 \omega^4 = 0, \quad (6)$$

A_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) — неизвестные постоянные, определяемые из решения системы линейных однородных алгебраических уравнений, полученной с учетом граничных условий

$$Y(0) = Y'(0) = Y''(0) = 0, \quad (7)$$

$$Y^{II}(1) = Y^{III}(1) = Y^V(1) - e_1 \omega^2 Y^I(1) = 0.$$

Из системы уравнений (7) с учетом (4), (5) и путем приравнивания к нулю детерминанта системы получены следующие частотные уравнения свободных изгибно-крутильных колебаний рассматриваемой системы:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & 0 & \lambda_3 \\ \lambda_1^4 & 0 & \lambda_2^4 & 0 & \lambda_3^4 & 0 \\ \lambda_1^2 \operatorname{ch} \lambda_1 & \lambda_1^2 \operatorname{sh} \lambda_1 & -\lambda_2^2 \cos \lambda_2 & -\lambda_2^2 \sin \lambda_2 & -\lambda_3^2 \cos \lambda_3 & -\lambda_3^2 \sin \lambda_3 \\ \lambda_1^3 \operatorname{sh} \lambda_1 & \lambda_1^3 \operatorname{ch} \lambda_1 & \lambda_2^3 \sin \lambda_2 & -\lambda_2^3 \cos \lambda_2 & \lambda_3^3 \sin \lambda_3 & -\lambda_3^3 \cos \lambda_3 \\ (\lambda_1^4 - e_1 \omega^2) \cdot (\lambda_2^4 - e_1 \omega^2) \cdot & -(\lambda_2^4 - e_1 \omega^2) \cdot (\lambda_3^4 - e_1 \omega^2) \cdot & -(\lambda_3^4 - e_1 \omega^2) \cdot (\lambda_1^4 - e_1 \omega^2) \cdot & & & \\ \lambda_1 \operatorname{sh} \lambda_1 & \lambda_1 \operatorname{ch} \lambda_1 & \lambda_2 \sin \lambda_2 & \lambda_2 \cos \lambda_2 & \lambda_3 \sin \lambda_3 & \lambda_3 \cos \lambda_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (8)$$

По разработанной методике составлена программа на ЭВМ типа ЕС и выполнены расчеты для различных зданий ствольной конструктивной системы. Анализ полученных данных показал, что с достаточной для практических расчетов точностью периоды собственных изгибно-крутильных колебаний многоэтажных зданий ствольной конструктивной системы можно определить по следующей формуле:

$$T_j = \frac{2eI^2}{\lambda_j} \sqrt{\frac{m}{EI_x}} \sqrt{\frac{2(1 - \nu^2)}{(\lambda_j^2 - \nu^2) - 1 - \nu^2 - 2\nu^2 \nu^2 (1 - 2\nu^2) + \nu^4}}, \quad (9)$$

$$(j = 1, 2, \dots),$$

где

$$\nu = \frac{a}{r}, \quad \nu^2 = \frac{H^2 G I_d}{r^2 E I_r}.$$

Значения λ_j для каждого тона собственных колебаний определяются на основании данных, приведенных на рис. 2, и зависимости от величины относительного эксцентриситета a/D (D — приведенный эквивалентный диаметр планш здания). С целью проверки разработанной

методики расчета проведены сравнительные экспериментально-теоретические исследования 9-этажного жилого здания, возведенного методом подъема в г. Ереване [1]. Динамические испытания здания проводились с помощью вибромашины типа В-1 [2]. Были получены диаграммы резонансных колебаний здания путем изменения частоты вращения

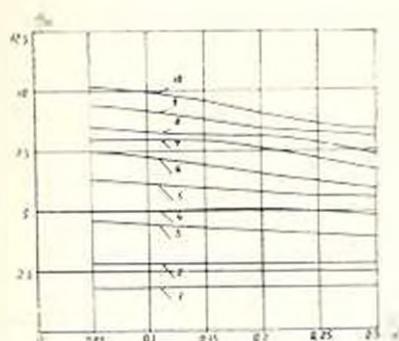


Рис. 2. Зависимость коэффициентов λ_i от величины относительного эксцентриситета $\frac{a}{D}$. Цифрами обозначены номера тонов собственных колебаний

вала вибромашины, а также осциллограммы свободно затухающих колебаний, регистрируемых при выключении и резком торможении вала вибромашины на резонансных частотах здания. Анализ данных показал, что при действии силы в продольном направлении здание совершает изгибно-крутильные колебания, обусловленные влиянием расчетного эксцентриситета, равного $a = 0,78$ м. Собственные частоты исследуемого 9-этажного здания при упругой его работе приведены в таблице. Там же для сопоставления даны соответствующие частоты собственных изгибно-крутильных колебаний здания, полученных расчетным путем в соответствии с разработанной методикой.

Таблица

Виды параметров	Собственные частоты при токах колебаний, Гц					
	I	II	III	IV	V	VI
Экспериментальные	1,72	1,90	5,10	6,01	8,90	11,10
Расчетные	1,63	1,91	4,95	6,10	8,25	11,55

Данные свидетельствуют о сходимости расчетных и экспериментальных значений собственных частот здания, что подтверждает о приемлемости разработанной методики. Следовательно, при практических расчетах многоэтажных зданий рассматриваемого типа, у которых центры масс и центры жесткостей не совпадают, определение периодов собственных изгибно-крутильных колебаний можно с достаточной точностью определить по вышеприведенной методике.

1. Шахмазарян С. X., Савкян Р. О., Савкян А. О. Возведение зданий методом ползения этажей и перекрытий.— М.: Изд-во лит. по стр., 1974.— 368 с.
2. Шаларо Г. А., Ашкенадзе Г. И., Симон Ю. А. Вибрационный метод испытания жилых и общественных зданий.— М.: ОПП ЦИНИЭП жилищн.— 1977.— 111 с.

ВИЭКТИ

ЭН. III. 1989

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIII, № 5, 1990, с. 216—220.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3.013.001.24

М. А. КАРАПЕТЯН

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В МОНОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ СО СФЕРОИДАЛЬНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ ВНЕШНЕМ ПОЛЕ

Последовано распределение поля в неоднородной среде в зависимости от величины поверхностной проводимости, объемной концентрации, формы сфероидальных включений и частоты внешнего синусоидального поля. Получены закономерности затухания поля во включениях и его усиление в среде с ростом поверхностной проводимости.

Ил. 2. Библиогр.: 4 назв.

Երկրամասերում է անցումային էլեկտրական դաշտի բարդանոթյան հաշվարկի միջոցով ներառման ներսում, այնպես էլ դրսում՝ նրա ցածր-բարձրի կետերում: Ուսումնասիրված է դաշտի շարժանոթյան նվազումը ներառման ներսում և դրա աճը դրսում՝ ծավերեսային հազար-գույնների անհիմ դրոշմից՝ կախված զեղանակի ներառման անհիմ, ծավալային խտությունից և արտաքին սինուսոիդալային դաշտի ճանախությունից:

В [1] исследовано электрическое поле в монодисперсной системе при внешнем постоянном поле и учете поверхностной проводимости включений. В этой работе показано, что выражения напряженностей поля внутри включений E_1 и в среде, у вершины включения, E_2 определяются совместным решением следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} E_1(s) &= E_0(s) - \frac{(1-f)N_s}{V\varepsilon_2} p(s), \\ E_2(s) &= E_0(s) + \frac{1-(1-f)N_s}{V\varepsilon_2} p(s), \\ p(s) &= V\varepsilon_2 n_s \frac{1-s^2\varepsilon_2}{1+s^2\varepsilon_2} E_0(s) \end{aligned} \quad (1)$$

где $E_0(s)$ — лапласово изображение напряженности $E_0(t)$ внешнего однородного поля; $p(s)$ — изображение дипольного момента $p(t)$ включения вдоль оси $2a$, параллельной вектору E_0 ; V и f — объем

включения и объемная концентрация включений в системе; N_a — коэффициент деполаризации включения вдоль оси $2a$; ε_2 — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды (ε_1 — включения);

$$\phi_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\gamma_1 - \gamma_2 + 2\gamma} ; \quad 2\gamma = \gamma_2 \frac{a^2}{b^2(b + \sqrt{a^2 - b^2})} ; \quad (2)$$

$$n_s = \frac{\gamma_1 - \gamma_2 + 2\gamma}{\gamma_2 + (\gamma_1 + \gamma_2 + 2\gamma)(1-f)N_a} ; \quad (3)$$

$$\gamma_2 = \frac{\varepsilon_2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(1-f)N_a}{\gamma_1 + (\gamma_1 - \gamma_2 + 2\gamma)(1-f)N_a} .$$

В (2) и (3) γ_1 и γ_2 — удельные объемные электрические проводимости включений и среды, γ_2 — удельная поверхностная электрическая проводимость включения, a и $b = c$ — полуоси сфероида.

Анализ этой же задачи при внешнем синусоидальном поле приводит к существенно отличающимся результатам по сравнению с [1]. Поэтому ниже исследуется распределение установившегося поля в дисперсной системе при внешнем синусоидальном поле в зависимости от объемной концентрации, формы и поверхностной проводимости сфероида, частоты поля.

При внешнем синусоидальном поле $E_0(f) = E_{om} \sin(\omega t + \psi_0)$ для оригиналов момента $p(t)$ и напряженностей $E_1(t)$ и $E_2(t)$ получаем

$$p(t) = V\varepsilon_2 n_s [k_9 \sin(\omega t + \psi_0 - \alpha_9) - k_{10} e^{-t/\tau_2} \sin(\psi_0 - \psi_9)] E_{om} . \quad (4)$$

$$E_1(t) = k_{11} E_{om} \sin(\omega t + \psi_0 - \psi_{11}) + (1-f) N_a k_{12} E_{om} e^{-t/\tau_2} \sin(\psi_0 - \psi_9) , \quad (5)$$

$$E_2(t) = k_{13} E_{om} \sin(\omega t - \psi_0 - \psi_{23}) - [1 - (1-f) N_a] k_{10} E_{om} e^{-t/\tau_2} \sin(\psi_0 - \psi_9) .$$

где

$$k_9 = \sqrt{\frac{n_s^2 + \omega^2 \tau_2^2}{1 + \omega^2 \tau_2^2}} , \quad k_{10} = \frac{m - n_s}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_2^2}} , \quad \psi_9 = \arctg \omega \tau_2 , \quad (6)$$

$$\alpha_9 = \psi_0 - \psi_{09} , \quad \psi_{09} = \arctg \omega \tau_2 , \quad m = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(1-f)N_a} ,$$

$$k_{11} = \sqrt{\frac{[1 - (1-f)N_a n_s]^2 + \omega^2 \tau_2^2 + (1-f)N_a n_s \omega^2 \tau_2^2}{1 + \omega^2 \tau_2^2}} , \quad (7)$$

$$k_{12} = \sqrt{\frac{\{1 + n_s [1 - (1-f)N_a]\}^2 + \omega^2 \tau_2^2 + n_s \psi_9 [1 - (1-f)N_a]\}^2}{1 + \omega^2 \tau_2^2}} ,$$

$$\varphi_{1s} = \arctg \omega \frac{(1-f)N_s n_s (\theta_s - \tau_s)}{1 - (1-f)N_s n_s + \omega^2 \tau_s (\tau_s + n_s \theta_s [1 - (1-f)N_s])^2}$$

$$\varphi_{2s} = \arctg \omega \frac{n_s [1 - (1-f)N_s] (\tau_s - \theta_s)}{1 + n_s [1 - (1-f)N_s] + \omega^2 \tau_s (\tau_s + n_s \theta_s [1 - (1-f)N_s])^2}$$

Из (5) следует, что между установившимися функциями напряженностей E_0 , E_1 и E_2 имеется фазовый сдвиг и поскольку $\theta_s \neq \tau_s$, знаки φ_{1s} и φ_{2s} противоположные. Следовательно, функция одной из напряженностей опережает, а другая — отстает по фазе от напряженности внешнего поля.

Согласно (5), k_{1s} и k_{2s} являются относительными значениями амплитуд установившихся составляющих функций $E_1(t)$ и $E_2(t)$. На рис. 1, 2 приводятся кривые k_{1s} и k_{2s} в зависимости от $\nu = \tau_s / \tau_0$, объемной концентрации f и формы N_s включений и частоты ω внешнего поля. Если анализировать кривые рис. 1, 2 только с точки зрения затухания ионизации (или поля) в газовом сферическом включении диэлектрика, можно отметить, что как при постоянном, так и синусоидальном полях величина концентрации включений практически не влияет на этот процесс. В отличие от случая внешнего постоянного поля, когда форма включения не влияет на процесс затухания ионизации [1], происходящей уже при $\tau_s = \tau_0$ (равенство числовым значениям), т. е. при $\nu = 1$, в случае синусоидального внешнего поля эта зависимость весьма существенна. Величина ν , определяющая затухание ионизации и полости в зависимости от ω , меняются в широких пределах. Так, если в случае $N = 1/3$ (сферическое затухание (рис. 1а) происходит при значении $\nu \approx 10^2$ (т. е. $\tau_s = 10^2 \tau_0$), то в случае $N = 1$ (дискообразное включение, перпендикулярное вектору E_0) $\nu \approx 10^2$ (рис. 1б). Получается, что чем короче ось сфероида, параллельная E_0 , тем затухание ионизации облегчено.

Сопоставляя кривые рис. 1, 2 а и б, можно заключить, что повышение угловой частоты внешнего поля с 3141/c до 10^2 /c приводит к повышению значения ν , необходимого для затухания ионизации, более чем на два порядка. Этот результат согласуется с экспериментальными данными [2]. Однако из этого факта нельзя сделать заключение, что при высоких частотах затухание ионизации в газовых включениях диэлектрика затруднено. Как показали эксперименты [2], интенсивность повышения проводимости стенок газовой полости под действием частичных разрядов с ростом частоты поля резко возрастает.

Проведенное исследование показало, что если при постоянном поле возникновение частичных разрядов или ионизация газовых включений диэлектрика невозможно, то при синусоидальном поле частичные разряды обязательно возникают. Под действием частичных разрядов повышается проводимость стенок полости, что может привести к

пробую диэлектрика вследствие повышения напряженности поля в среде в зависимости от l (см. кривые k_{12} , рис. 1, 2), либо затуханию ионизации [2—4]. В случае включений из твердых материалов с высокой поверхностной проводимостью возникает опасность пробоя диэлектрика особенно при высоких концентрациях включений.

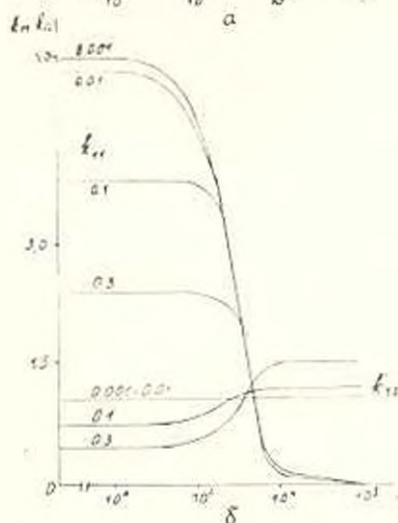
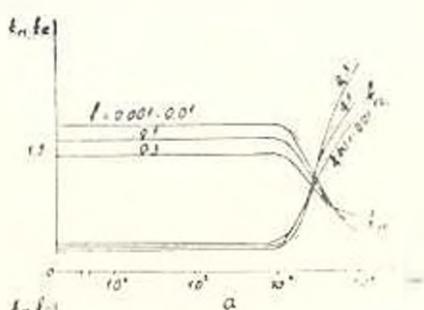
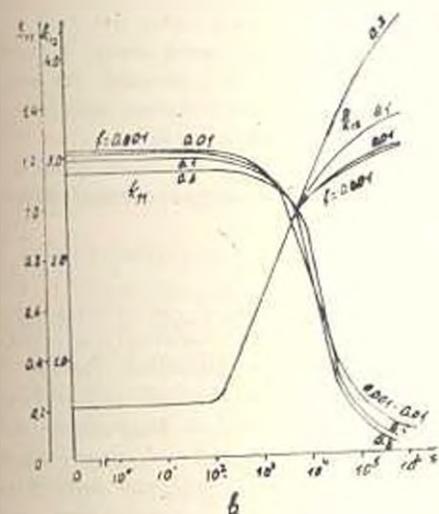
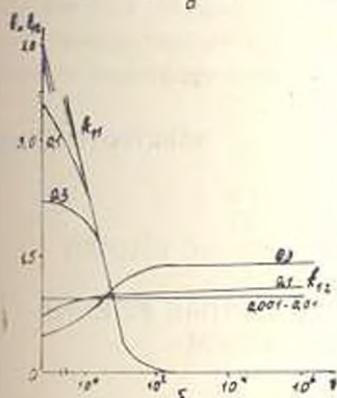
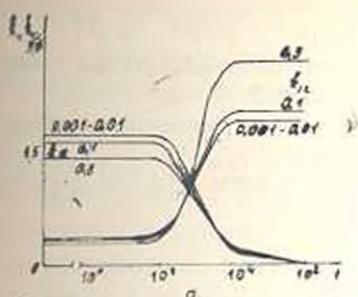
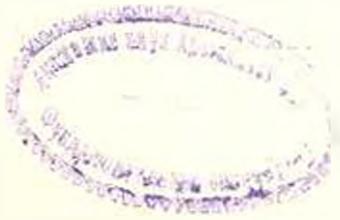


рис. 1. Зависимость коэффициентов k_{11} и k_{12} от отношения $\gamma = \gamma_2/\gamma_1$ и концентрации l сферондальных включений при угловой частоте внешнего однородного синусоидального поля $\omega = 314$ 1/с и при $a = 10^{-1}$ м, $\gamma_1 = 10^{-16}$ С.м.м., $\gamma_2 = 10^{-14}$ С.м.м., $\epsilon = 1$ при $N = 0,53$, $b = N = 1$, $\delta = N = 1,3$.

рис. 2. Зависимость коэффициентов k_{11} и k_{12} от отношения $\gamma = \gamma_2/\gamma_1$ и концентрации l сферондальных включений при угловой частоте внешнего однородного синусоидального поля $\omega = 10^7$ 1/с и при $a = 10^{-1}$ м, $\gamma_1 = 10^{-16}$ С.м.м., $\gamma_2 = 10^{-14}$ С.м.м., $\epsilon = 1$ при $N = 0,53$, $b = N = 1$.



1. Карапетян М. А. Переодное электрическое поле в монодисперсной системе со сферическими включениями при учете поверхностной проводимости // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.— 1988.— Т. XLII, № 6.— С. 6—12.
2. Meson J. // The generation and breakdown of dielectrics resulting from internal discharge. Jour. IEE.— 1951.— V. 98, P. 1, № 109 — P. 44—57.
3. Зарин Д. Д. Прямой автоматического затухания ионизации в газонаполненных катодных трубках // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.— 1988.— Т. XLII, № 6.— С. 6—12.
1. Карапетян М. А. Влияние ионизации на разрядную плотность кабеля // Науч. тех. сб. ИИИИ — Ереван, 1962 — № 3 (7).— С. 21—32.

ЕрИИ

30 IV. 1988

Изв. АН Армении (Сер. ТН), т. XLIII, № 5, 1990 с. 220—225.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.382.062.8:621.382.33

Р. В. АВАГЯН, А. А. ВАРДАНЯН, Г. Г. КИРАКОСЯН, А. С. ШАБОЯН

СИЛОВЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ КЛЮЧИ С МНОГОКАСКАДНЫМ УСИЛЕНИЕМ

Приведена методика для теоретического расчета коэффициента усиления $\mu_{дл}$ в цепях силовых многокаскадных транзисторных ключей. При разработке методики использована модель управления зарядом с учетом эффекта накопления заряда в модуляции коллекторного слоя. Приведены результаты расчета по этой методике для трехкаскадного транзисторного ключа правильности которых подтверждается экспериментальными исследованиями на опытных транзисторных ключах, изготовленных по технологии транзисторов серии ТКД. По анализу этих результатов рекомендуется использовать методику на практике при расчете и конструировании силовых многокаскадных транзисторных ключей.

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 5 назв.

Ներկայացված է սիմպլե բազմաստիճան տրանզիստորային բանալու՝ բուն լուսանքի սիմպլե դացման գործակցի տեսական հաշվարկի մեթոդը: Մեթոդի հիմնական ժամանակ որպես կիսաբնական է վերջի կառավարման մոդելը: Հաշվի առնելով վերջի կառավարման երեւոյթը և հաճախիչ շերտի մոդուլացումը: Մեթոդը Ան եռաստիճան տրանզիստորային բանալու այս մեթոդով կատարված սովորական գործակցի հասանքային կախիմություն հաշվարկները: Երկրորդ կասարված սովորական գործակցի հասանքային կախիմություն հաշվարկները: Երկրորդ կասարված սովորական գործակցի հասանքային կախիմություն հաշվարկները: Հիմնական արդյունքների վերլուծության վրա՝ առաջարկվում է գործնականում օգտագործել այդպիսի մեթոդը սիմպլե բազմաստիճան տրանզիստորային բանալիների հաշվարկման և կոնստրուկցիայի ժամանակ:

Силовые транзисторные ключи с многокаскадным усилением благодаря высоким значениям коэффициента усиления, полной управляемости по входной цепи, быстрдействию и компактности монтажа могут стать оптимальным переключающим элементом в силовых цепях и устройствах, непосредственно питающихся от сетей 220 и 380 В. Не-

смотря на интенсивное изучение усилительных свойств силовых транзисторов, инженерная практика до сих пор нуждается в относительно несложных моделях для расчета токовой зависимости коэффициента усиления [1, 2]. Такая ситуация обусловлена сложностью одновременного учета основных факторов, влияющих на характер спада коэффициента усиления при умеренных и высоких уровнях инжекции тока, таких, как влияние модуляции проводимости базы и высокоомного коллектора, расширение квазинейтральной базы, эффект оттеснения эмиттерного тока — с одной стороны, и конструктивно-технологические факторы (диффузионные профили, геометрия эмиттера) — с другой.

В настоящей работе предлагается усовершенствованная модель для расчета токовой зависимости коэффициента усиления многокаскадных транзисторных ключей с учетом одновременного влияния вышеперечисленных факторов.

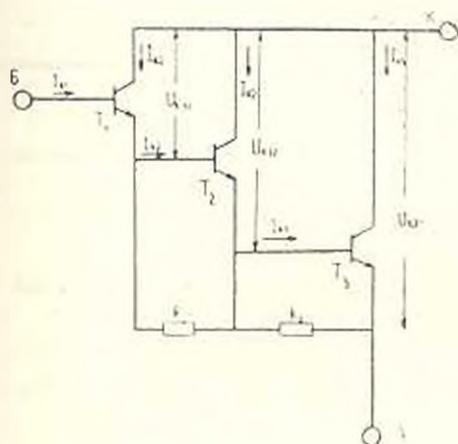


Рис. 1. Электрическая схема составного трехкаскадного транзисторного ключа

Электрическая схема составного трехкаскадного транзисторного ключа приведена на рис. 1. Многокаскадное усиление тока по приведенной схеме и возможности работы транзисторов T_1 , T_2 и T_3 в сравнительно глубоком режиме насыщения при прочих равных условиях позволяют по сравнению с обычными транзисторами увеличить допустимую мощность тока коллектора и, следовательно, ток коммутации в 1,5—2 раза. На рис. 2 представлена топология структуры трехкаскадного микроволнового составного транзистора Дарлингтона с эвольвентной топологией диаметром 32 мкм и ее поперечный разрез.

Расчет статических характеристик подобного транзистора с n^+p-n-n^+ структурой, создаваемой путем двойной диффузии примесей в исходные nn^+ структуры по технологии изготовления силовых транзисторов серии ТКД, в конечном счете сводится к определению выходного $I_k = I_{k1} + I_{k2} + I_{k3}$ и входного $I_b = I_{b1}$ токов, т. е. интегрального коэффициента усиления по току транзистора Дарлингтона $\beta_{инт}$ для заданного значения напряжения на транзисторе

$U_{k1} = U_{k2}$. Нетрудно получить выражение h_{21kD} , связывающее его со значениями коэффициентов усиления токов одиарных транзисторов $T_1, T_2, T_3 - h_{21ki}$ ($i = 1, 2, 3$) [3]

$$h_{21kD} = \sum_{i,j,k} \left[h_{21ki} + h_{21ki} h_{21kj} + \frac{1}{6} h_{21ki} h_{21kj} h_{21kl} \right] \quad (1)$$

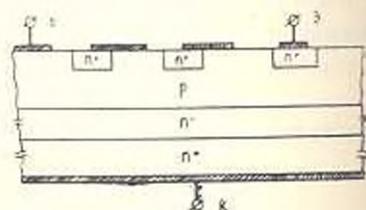
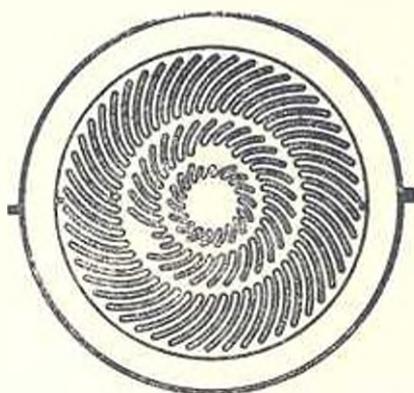


Рис. 2а. Топология структуры трехкаскадного монолитного составного транзистора.

Рис. 2б. Лонгитудинальный разрез трехкаскадного монолитного транзистора.

Это упрощает задачу, сводя ее к определению токов зависимости коэффициента усиления тока одиарного транзистора. Для расчета h_{21k} одиарного транзистора в зависимости от коллекторного тока исходили из модели управления зарядом. Согласно определению коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером

$$h_{21k} = \gamma (1 - \beta), \quad (2)$$

где $\gamma = K/(K+1)$ — эффективность эмиттера, β — коэффициент переноса неосновных носителей заряда (ННЗ) через базу, который в общем случае определяется выражением [2]

$$\beta = |\operatorname{ch}(W_b/2L_n)|^{-1}, \quad (3)$$

где W_b — толщина квазинейтральной базы, а L_n — диффузионная длина ННЗ в базе. Значение K (коэффициент инжекции эмиттера) тождественен максимальному коэффициенту усиления h_{21ka} и равен [4]

$$K = (Q_{e0}/D_e)(Q_{b0}/D_b), \quad (4)$$

где Q_{e0}, D_e и Q_{b0}, D_b — числа Гуммеля для эмиттера и базы соответственно. При выборе модели расчета h_{21k} (I_k) надо учитывать еще влияние эффектов, проявляющихся при высоких уровнях инжекции.

При увеличении уровня инжекции вследствие конечного времени пролета ННЗ через базу τ_{np} в нейтральной области активной базы начинает накапливаться заряд ННЗ ΔQ_0 , снижая эффективность эмитте-

ра. Накопленный заряд (на единицу площади перехода) зависит от τ_{np} и плотности коллекторного тока I_k

$$\Delta Q_s = \tau_{np} I_k \approx \tau_{np} I_k S_1, \quad (5)$$

где S_1 — площадь эмиттера.

С учетом (5) для K получим

$$K = (Q_{s0} D_s) / ((Q_{s0} + \tau_{np} I_k) D_s). \quad (6)$$

Комбинируя выражения (2) — (6), для h_{21} получаем

$$h_{21} = \{ [1 + (Q_{s0}^2 D_s) / (Q_{s0} D_s)] - W_{k0}^2 I_k / 4q \bar{D}_s S_1 (Q_{s0} D_s) \} \operatorname{ch}(W_c (2L_n)) - 1 \}^{-1}. \quad (7)$$

В условиях высоких уровней инжекции в коллекторной области необходимо учитывать также эффект расширения квазинейтральной базы — эффект Кирка, который играет основную роль в увеличении заряда базы в высоковольтных транзисторах. Расширение квазинейтральной базы при фиксированном значении U_{k0} начинается с некоторого значения коллекторного тока $I_k = I_{k0}$, которое определяется из условия нулевого смещения на коллекторном p - n -переходе и при полном падении напряжения U_{k0} на сопротивлении коллекторного слоя

$$I_{k0} = U_{k0} S_2 / \rho_k W_{k0} \approx U_{k0} S_2 / \rho_k W_{k0}, \quad (8)$$

где W_{k0} и ρ_k — толщина и удельное сопротивление выемного коллекторного слоя. Ширина индуцированной током базы W_{k0} при $I_k > I_{k0}$ определяется выражением $W_{k0} = W_{k0} (1 - I_k / I_{k0}) / U_{k0}$. С учетом этого эффекта выражение (7) для h_{21} примет вид

$$h_{21} = \{ [1 + (Q_{s0}^2 D_s) / (Q_{s0} D_s)] + (W_{k0} + W_{k0}^{(0)})^2 I_k / 4q \bar{D}_s S_1 (Q_{s0} D_s) \} \times \\ \times \operatorname{ch}\{ (W_c + W_{k0}^{(0)}) (2L_n) \} - 1 \}^{-1}, \quad (9)$$

где D — усредненное значение коэффициента диффузии ПНЗ в квазинейтральной активной базе и базе, индуцированной током.

При расчетах для h_{21} за основу было выбрано выражение (9). Что касается учета при высоких уровнях инжекции эффектов отсечения эмиттерного тока (ЭОЭТ) и поперечного растекания линий тока (ПРЛТ), делается допущение, что последние компенсируют друг друга, физический смысл которого заключается в том, что если ЭОЭТ уменьшает эффективную площадь эмиттера, то ПРЛТ, наоборот, в определенной степени способствует увеличению эффективной площади коллектора [5]. Для получения токовой зависимости h_{21} с использованием (1) для коэффициентов усиления по току односторонних транзисторов T_1 , T_2 и T_3 помимо выражения (9) можно написать также выражения

$$h_{21\beta 1} = I_{k1} / I_{\beta 1}, \quad (10)$$

$$h_{21\beta 2} = I_{k2} (I_{\beta 1} + I_{k1}), \quad (11)$$

$$h_{21\beta 3} = I_{k3} (I_{\beta 1} + I_{k1} + I_{k2}). \quad (12)$$

Решая уравнение (10) для определенного значения $I_{\beta 1}$, находим I_{k1} , подставив значение I_{k1} в уравнение (11), и, решая его, получаем I_{k2} и, наконец, подставляя значение I_{k2} в (12) — определяем I_{k3} . Изменяя значение входного базового тока $I_{\beta 1}$, получаем весь спектр

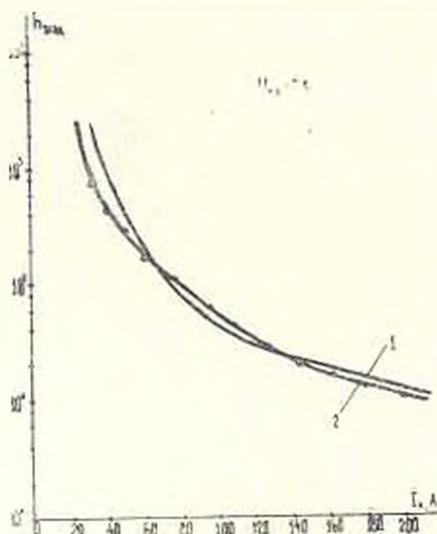


Рис. 3. Кривые зависимости $h_{21\beta 3}(I_k)$: 1 — теоретическая, 2 — экспериментальная.

значений функциональной зависимости $h_{21\beta 3}(I_k)$ для интересующего диапазона значений I_k , при этом надо отметить, что для определения $W_{k1\beta}^{(1)}$, $W_{k1\beta}^{(2)}$ и $W_{k1\beta}^{(3)}$ принимали $U_{k\beta 1} = 1$ В, $U_{k\beta 2} = 2$ В, $U_{k\beta 3} = 3$ В соответственно для транзисторов T_1 , T_2 и T_3 (рис. 11). По алгоритму, изложенному выше, был сделан машинный расчет $h_{21\beta 3}(I_k)$ для силового трехкаскадного транзистора. На рис. 3 приведены расчетная и экспериментальная кривые зависимости $h_{21\beta 3}(I_k)$ при $U_{k\beta 3} = 3$ В, последняя снята на транзисторной структуре с удельным сопротивлением и толщиной n^- коллекторного слоя $\rho_{k^-} = 80 \Omega \cdot \text{см}$ и $W_{k0} = 100$ мкм соответственно, изготовленной по технологии силовых транзисторов серии ТКД. Данные, использованные при расчете, приведены в таблице.

Таблица

$h_{21\beta 3}$	D_1 см ² /с	$Q_{k1} D_{k1}$ см ³ /с	W_{k0} мкм	τ_1 мкс	ρ_{k^-} Ω·см	W_{k0} мкм	$U_{k\beta 1}$ В	$U_{k\beta 2}$ В	$U_{k\beta 3}$ В	$S_{\beta 1}$ см ²	$S_{\beta 2}$ см ²	$S_{\beta 3}$ см ²
40	20	$6 \cdot 10^{11}$	27	8	80	100	1	2	3	0,3	0,85	3

Анализ полученных экспериментальных и теоретически рассчитанных на основе предложенной модели зависимостей коэффициента усиления транзистора с трехкаскадным усилением показывает удовлетворительное совпадение полученных результатов. Это свидетельствует о приемлемости принятых допущений и достоверности предложенной модели для расчета коэффициента усиления по току многокаскадных транзисторных ключей, которую можно рекомендовать для использования на практике при расчете и конструировании силовых транзисторов данного класса.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Walker P. I.* Optimum Design of Power Transistor Switches. IEEE Transactions on Electron Devices. — 1973. — V. ED-20 № 4 — P. 426—435.
2. *Башар А.* Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 421 с.
3. *Варданян А. А., Татевосян Р. Г., Шабоян А. С.* Силовые биполярные транзисторы и транзисторные модули // Электротехника. — 1988. — № 5. — С. 30—33.
4. *Алвлян Р. В., Варданян А. А., Малышева Л. И.* Исследование влияния глубины задегашия эмиттерного перехода на коэффициент инжекции эмиттера силовых транзисторов серии ТК // Сб.: Технология быстродействующих силовых полупроводниковых приборов. — Галлин: Изд-во Валтус, 1984. — С. 110—116.
5. *Варданян А. А., Гукасян М. А., Татевосян Р. Г., Шабоян А. С.* Особенности протекания тока и сопротивления насыщения в силовых кремниевых транзисторах с высокоомным коллектором // Электротехническая промышленность. Сер. Производственная техника. — М.: Информэлектро, 1981. — Вып. 5 (163) — С.

НПО «Транзистор»

20. VI. 1989

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIII, № 5, 1990, с. 225—228.

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.373

Р. А. КАЗАРЯН, А. Л. КАЗАРЯН

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ КОГЕРЕНТНО-РАЗНОСТНОГО МЕТОДА ПРИЕМА ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Приведено аналитическое сравнение (по критерию сигнал/шум) разнородности когерентно-разностного способа приема оптического сигнала в случайно-неоднородных каналах. Показано, что в случае применения ОКУ с последующим обращением фазового фронта принятого с задержкой оптического сигнала когерентно-разностной способ приема становится конкурентно способным с обычным гетеродинным методом без недостатков последнего (необходимость в наличии стабильного гетеродина).

Ил. 2. Библиогр.: 4 назв.

Հակիրճ կերպով բերված է պատասխան սնունդային կայունացման օպտիկական ազդանշանի ընդունման կոնքրետ-տարրերակալին հղանակի տարրերակների վերլուծական ամենատարբերակի ազդանշանազուտի չափանիշով ճյուղ է սրված, որ չբնկով որպես օպտիկական ազդանշանի արժանիքի ճակատը և իրականացնելով ՈՔՈՒ, օպտիկական ազդանշանի ընդունման կոնքրետ-տարրերակալին հղանակը կարող է մրցակցել ընդունման ճեպարդի-նակի հղանակի հետ:

Как известно [1], когерентный или гетеродинамный способ приема модулированного оптического сигнала по сравнению с непосредственным (прямым) фотодетектированием обладает двумя существенными преимуществами: а) обеспечивает за счет энергии опорного генератора более высокую чувствительность; б) позволяет осуществить помехоустойчивую угловую (ФМ, ЧМ) модуляцию, поскольку при гетеродинамизации (смешании принятого и опорного сигналов) имеет место обычное транспонирование спектра, сохраняющее информацию о фазе оптического сигнала. Известны и основные недостатки гетеродинамного приема, осложняющие его применение — необходимость в опорном излучателе с жесткими требованиями к его когерентности с принятым сигналом и совмещению их волновых фронтов. Поэтому эффективный гетеродинамный прием серьезно затруднен, а подчас и невозможен в каналах, разрушающих когерентность (атмосфера, многомодовое световолокно). Компромиссным является когерентно-разностный способ приема, в котором опорным служит задержанное по времени значение принятого сигнала. Как показывают теоретические исследования [2], эффективность такого приема на основе информационного (шенноновского) критерия предпочтительна перед гомодинамным (частоты опорного и принятого сигналов совпадают) в каналах с глубокими, но медленными флуктуациями фазы. Но при этом теряется одно из достоинств гетеродинамного способа — его высокая чувствительность, т. к. опорным служит задержанное значение сигнала, мощность которого меньше или равна мощности текущего значения.

Можно поднять чувствительность когерентно-разностного приема, введя оптический квантовый усилитель (ОКУ), усиливающий задержанное опорное излучение. В этом случае для исключения искажений, вносимых ОКУ, желательно прибегнуть к обращению волнового фронта (ОВФ), осуществляемого в кювете с нитробензолом или в отрезке световолокна. Возможные структуры реализации показаны на рис. 1 и 2. Оптическая несущая, излученная ОКГ 1, модулируется в модуляторе 2 сигналом от источника информации 3. После прохождения канала 4 сигнал поступает в интерферометр Майкельсона 5, 6, 8, одно из зеркал 8 которого осуществляет ОВФ. Дважды усиленная в ОКУ 7, обращенная и задержанная часть оптического сигнала с помощью светоделительной пластинки 5, подается на фотодетектор 9, куда поступает также текущее значение сигнала от зеркала 6. Необходимая задержка M опорного луча осуществляется заданием разницы M плеч интерферометра l_1, l_2 так, чтобы

$$\Delta t = 2(l_2 - l_1)/c \ll \tau_{\text{ког}} = 1/\Delta\nu,$$

где ν — скорость распространения света, $\Delta\nu$ — ширина линии излучения источника, а $\tau_{\text{ког}}$ — время когерентности излучения.

На рис. 2 функции ОКУ и ОВФ зеркала выполняет отрезок активного оптоволокна 10, подкачиваемого источником 11.

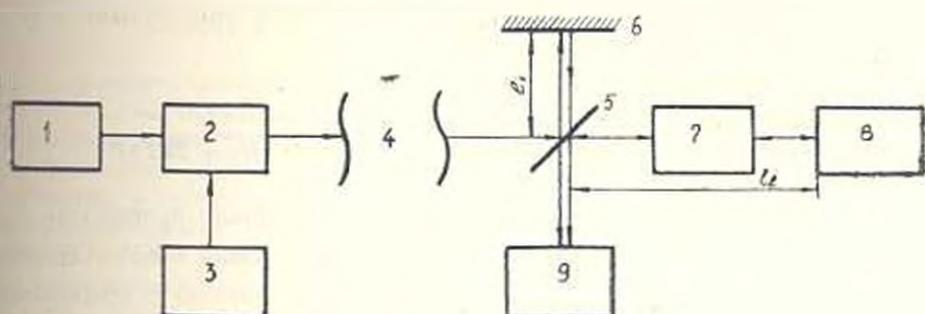


Рис. 1.

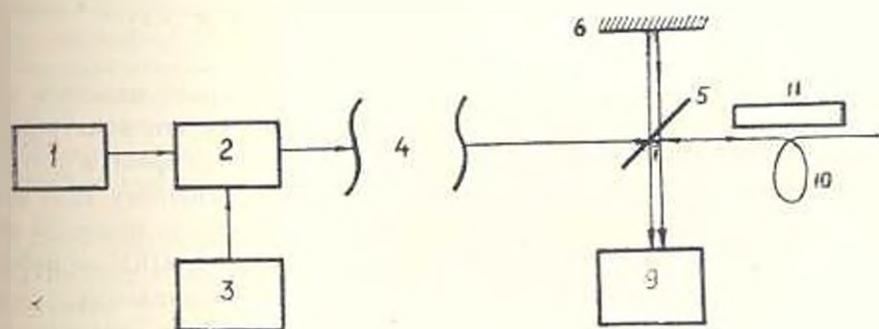


Рис. 2.

Сравним отношения сигнала к шуму (С/Ш) для случаев с ОКУ и без него, взяв за исходное — выражение для гетеродинного приема. В случае пренебрежения влиянием разъюстировки и мультипликативных помех в канале имеем [3]

$$(C/Ш)_1 = \frac{(G\eta e h\nu_s)^2 P_{\text{сиг}} P_{\text{л.о.}} R_n}{G^2 e^2 \Delta F [\eta e h\nu_s (P_{\text{сиг}} + P_{\text{оп}} + P_{\text{ф}}) + I_{\text{т}}] R_n + 2kT\Delta F}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, η — квантовая эффективность фотоэлектрода, G — усиление фотоприемника, $I_{\text{т}}$ — средний темновой ток, R_n — сопротивление нагрузки фотоприемника, ΔF — ширина полосы по разностной частоте, h , k — постоянные Планка и Больцмана, T — абсолютная температура, ν_s — оптическая частота сигнала.

В случае приема без ОКУ из (1) имеем

$$(C/Ш)_2 = \frac{(G\alpha)^2 P_{\text{сиг}} R_n}{G^2 e^2 \Delta F [\alpha (2P_{\text{сиг}} + P_{\text{ф}}) + I_{\text{т}}] R_n + 2kT\Delta F}, \quad (2)$$

где $\alpha = e\eta h\nu_s$ и принято, что $P_{\text{оп}} = P_{\text{сиг}}$.

При наличии ОКУ

$$(СШ)_2 = \frac{(G_2)^2 K P_c^2 R_n}{G^2 e \Delta F [2(P_c + K P_{оп} + P_{\phi}) + I_1] R_n + 2kT \Delta F} \quad (3)$$

здесь K — усиление ОКУ. Поскольку полоса ОКУ на несколько порядков уже полосы фотодетектора, в (3) пренебрегли спонтанными и фоновыми шумами ОКУ, следовательно

$$\frac{(СШ)_2}{(СШ)_1} = K \frac{G^2 e \Delta F [2P_c + P_{\phi}] + I_1 | R_n + 2kT \Delta F}{G^2 e \Delta F [2(P_c(1+K) + P_{\phi}) + I_1] R_n + 2kT \Delta F} \quad (4)$$

В оптическом диапазоне $h\nu \gg kT$, кроме того, можно пренебречь P_{ϕ} по сравнению с $P_c(1+K)$ и с этой целью введем ОКУ. Обычно темновые шумы I_1 также пренебрежимы по сравнению с дробовыми шумами опорного и сигнального излучений, следовательно

$$\frac{(СШ)_2}{(СШ)_1} \approx \frac{K(2P_c + P_{\phi})}{P_c(1+K)} > 1, \quad \text{если } K > 1.$$

Таким образом, применение ОКУ с ОВФ позволяет повысить чувствительность когерентно-разностного приема, делая его конкурентно-способным с гетеродинамным. Но ОВФ — нелинейный эффект и для его возбуждения требуется значительная мощность. Поэтому если речь идет о приеме слабых импульсов (при сильных — задача решается технически простым прямым фотодетектированием), то от ОКУ потребуются значительное (многоступенчатое) усиление. По-видимому, более перспективным является именно такой способ приема в световолоконном канале. Ввиду неизменности (во времени) его неоднородностей в качестве ОВФ-зеркала можно применить голограмму, реализующую обращение и слабого сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казарян Р. А. Гетеродинамный прием оптического сигнала и его применение // Итоги Науки и Техники. Радиотехника. 1984. — Т. 33. — С. 176—200.
2. Держин И. А. и др. Квантовый прием дискретных фазомодулированных сигналов в оптическом диапазоне // Радиотехника и электроника. 1980. — 24, № 10 — С. 2088—2098.
3. Притт В. К. Лазерные системы связи. — М.: Связь, 1972 — 226 с.

ЕрПН

10 VI 1989

УДК 681.5.01.013

В. Н. НЕРСЕСЯН, К. Б. БЕРБЕРЯН

СИНТЕЗ КОРРЕКТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Предлагается способ синтеза корректирующих устройств линейных САУ, при котором на основе предварительного анализа параметров системы, полученных при исследовании характеристического уравнения системы методом производной аргумента, формируется желаемый вид логарифмической амплитудной характеристики (без построения) и соответствующее ей характеристическое уравнение, исследуемое затем методом производной аргумента с целью проверки полученных параметров. Таким образом, показана возможность единого подхода к анализу и синтезу линейных САУ на основе метода производной аргумента.

Ил. 1. Библиогр.: 5 назв.

Վերաբերվում է գծային ԱՆՀ-ների ճշտող սարքերի համադրման մի եղանակ, որտեղ համադրող պարամետրերի նախնական վերլուծության հիման վրա ստացված արգումենտի ածանցյալի բևեռացող հաճախման հետազոտությանը ձևավորվում են ցանկայի լոգարիթմա-ամպլիտուսային բևեռացող տեսք (առանց կառուցման) և նրան համապատասխանող բևեռացող հաճախումը, որը հետագայում հետազոտվում է արգումենտի ածանցյալի եղանակով՝ ստացված պարամետրերը ստուգելու նպատակով: Այսպիսով ցույց է տրվում գծային ԱՆՀ-ների վերլուծության և համադրման խնդրին մոտեցման միասնական եղանակ՝ արգումենտի ածանցյալի եղանակի հիման վրա:

Цель настоящей работы — показ возможности осуществления единого подхода к анализу и синтезу линейных систем автоматического управления (САУ) на основе метода производной аргумента (МПА) [1]. Пусть характеристическое уравнение линейной разомкнутой САУ в общем случае имеет вид

$$F(s) = s^r \sum_{i=1}^{n-r} (1 + T_i s) + K = 0, \quad r = 0, 1, 2. \quad (1)$$

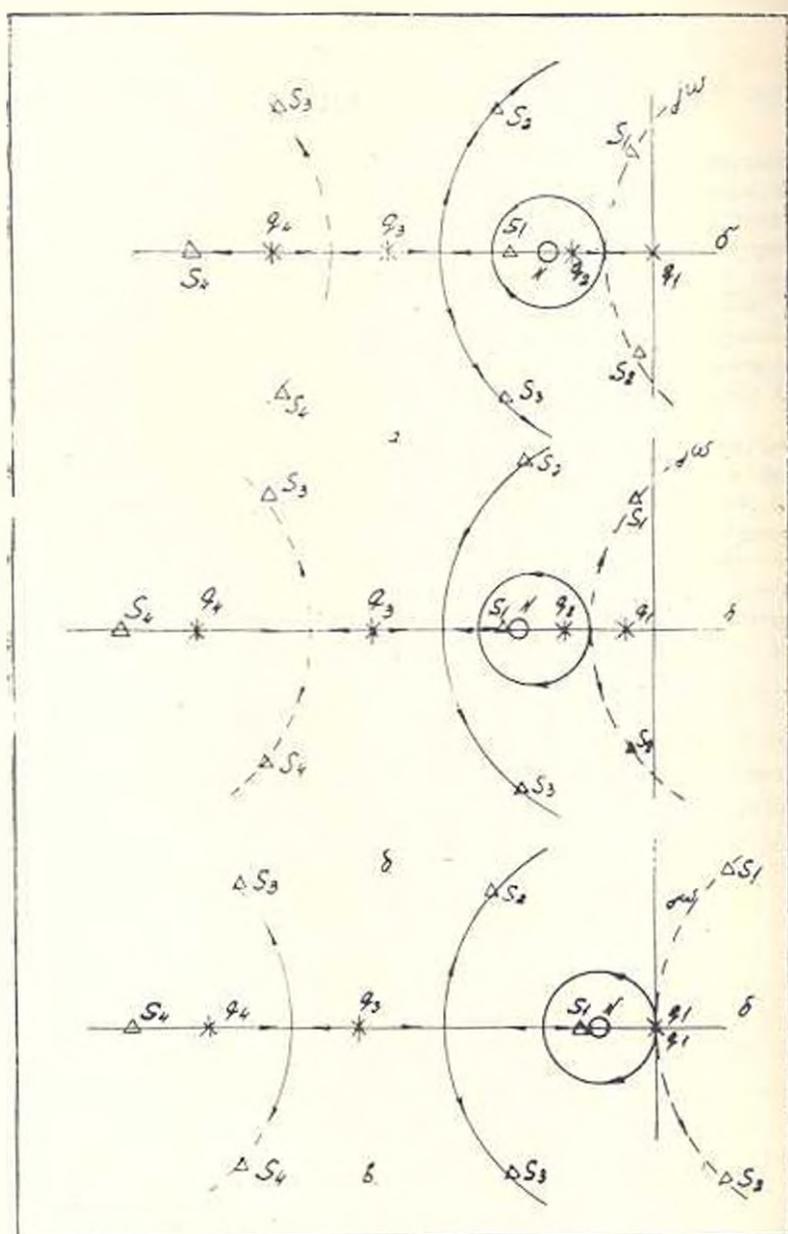
где r — степень астатизма, а K — коэффициент усиления разомкнутой линейной САУ.

Предположим, что исследование характеристического уравнения (1) с помощью функции производной аргумента [1]

$$R(\omega) = \frac{d}{d\omega} [\arg F(j\omega)] = \frac{U'V - U'V'}{U^2 + V^2} = \sum_{m=1}^n \frac{-\delta_{m1}}{s_m^2 + (\omega - \omega_m)^2}, \quad (2)$$

где $s_m = \sigma_m + j\omega_m$ — корни многочлена $F(s)$, а $U = \operatorname{Re} F(j\omega)$, $V = \operatorname{Im} F(j\omega)$, $U' = dU/d\omega$, $V' = dV/d\omega$, показало необходимость введения корректирующих устройств в САУ. Синтез осуществляем путем формирования желаемой логарифмической амплитудной характеристики (ЛАХ) разомкнутой САУ, начиная с низкочастотного участка ЛАХ [2, 3], определяющего точностные характеристики системы и заканчиваящимся выбором первых больших постоянных времен T_1 и T_2 .

Наиболее важный, с точки зрения динамики переходного процесса среднечастотный участок выбирается согласно требуемому показателю колебательности M [2].



Рис

Рассмотрим более подробно вопрос выбора сопрягающих частот среднечастотного участка ЛАХ ω_2 и ω_3 и обратимся к рисунку, где изображены траектории движения корней S , соответственно астатической системы первого порядка (а), статической системы (б) и астатической

системы второго порядка (θ). Как известно из метода корневого годографа [4], начало движения корней s_1 находится при $K = 0$ в соответствующих полюсах разомкнутых систем и затем, подчиняясь известным правилам, уходят в бесконечность при $K \rightarrow \infty$. Так например, корни s_2 и s_3 , образованные близлежащими к мнимой оси полюсами q_1 и q_2 , быстро пересекают мнимую ось и уходят в бесконечность (пунктирные линии), делая соответствующую систему неустойчивой. Однако введение нуля N (соответствующего сопрягающей частоте ω_2) после полюса q_2 приводит к компенсации корня s_1 нулем N при $K \rightarrow \infty$. Второй же корень s_2 при увеличении K движется по вещественной оси навстречу корню s_1 , образованному полюсом q_3 , который также изменяет направление своего движения. При некотором $K_{кр}$ эти корни встречаются на вещественной оси, образуя кратный корень, затем отрываются от вещественной оси, образуя комплексно сопряженные корни s_2 и s_3 и по траектории, изображенной сплошной линией, уходят в бесконечность, пересекая мнимую ось. Однако это пересечение происходит при намного большем коэффициенте усиления K , чем в случае отсутствия нуля N . Причем, чем длиннее участок между q_3 и N , т. е. ω_2 и ω_3 , тем при одинаковых K корни s_2 и s_3 будут дальше от мнимой оси и ближе к вещественной оси и тем меньше их влияние на переходный процесс в системе, определяемой в этом случае лишь корнем s_1 , который при $K \rightarrow \infty$ стремится к нулю N . Таким образом величина N (соответственно ω_2 и T_2) определяет в основном наиболее длительную составляющую в переходном процессе и фактически определяет время регулирования t . Следовательно, при оптимальном подборе T_2 можно так расположить преобладающие корни s_1 , s_2 и s_3 , чтобы удовлетворялись заданные требования как по длительности переходного процесса, так и по колебательным параметрам переходного процесса. Это оптимальный подбор проведем на основе функции производственной аргумента (2). Для чего рассмотрим значение $R(\omega)$ при $\omega = 0$, имеющего вид

$$R(0) = V/U \approx 1/\delta_1 + 2\delta_2/(\delta_2^2 + \omega_2^2), \quad (3)$$

где δ_1 — вещественный корень, который при $K \rightarrow \infty$ стремится к нулю N и определяет в основном длительность переходного процесса [1] $t \approx 3 \max R(\omega) = 3/\delta_1$, а $(-\delta_2 \pm j\omega_2)$ — два комплексно-сопряженных корня, находящиеся вблизи мнимой оси и определяющие колебательные свойства системы, в частности, число колебаний $N \approx \omega_2/\delta_2$ [1].

Подберем взаимное расположение корней s_1 , s_2 и s_3 таким образом, чтобы $\max R(\omega) = R(0)$, т. е. $R(0) > R(\omega)$ при $\omega \neq 0$, в частности при $\omega = \omega_2$, когда вторая составляющая (3) получает максимальное значение $2/\delta_2$, т. е.

$$R(0) \approx 1/\delta_1 + \frac{2/\delta_2}{\delta_2^2 + \omega_2^2} > \frac{\delta_2}{\delta_1^2 + \omega_2^2} - \frac{2}{\delta_1} \approx R(\omega_2). \quad (4)$$

Например, при $\delta_1 = \delta_2/2$ условие (4) выполняется и для $R(0)$ с учетом того, что $t \approx 3/\delta_1$ и $N \approx \omega_2/\delta_2$. Тогда запишем

$$R(0) > 1 \delta_1 + 1 [\delta_1 (1 + N^2)] = 3 + \varepsilon [3(1 + N^2)]. \quad (5)$$

Для выбора сопрягающей частоты $\omega_2 = 1/T_2$ рассмотрим три случая:

а) статическая система —

$$R(0) = V/U = (T_0 + T_1)K + T_2 + T_1 K + \dots + T_0 K > 3 + \varepsilon [3(1 + N^2)], \quad (6)$$

$$T_2 \geq 3 + \varepsilon [3(1 + N^2)] - C_1,$$

где $C_1 = (T_0 + T_1)K$ — коэффициент ошибки;

б) астатическая система первого порядка —

$$R(0) = V/U = T_2 + 1/K > 3 + \varepsilon [3(1 + N^2)], \quad (7)$$

$$T_2 \geq 3 + \varepsilon [3(1 + N^2)] - 1/K;$$

в) астатическая система второго порядка —

$$R(0) = V/U = T_2 \geq 3 + \varepsilon [3(1 + N^2)]. \quad (8)$$

Зная $\omega_2 = 1/T_2$ и исходя из требуемых значений показателя колебательности M , определяем длину участка λ и сопрягающую частоту $\omega_3 = 1/T_3 = h\omega_2$ [2]. Сформированную таким образом систему легко исследовать с помощью МПА, построив функцию $R(\omega)$.

Пример [5]. Неизменная часть синтезируемой разомкнутой системы имеет передаточную функцию

$$W(s) = 300 [s(0,1s + 1)(0,003s + 1)]. \quad (9)$$

Требуется выбрать корректирующее устройство, обеспечивающее

получение следующих характеристик качества замкнутой системы:

а) система должна обладать астатизмом первого порядка; б) коэффициенты ошибок по скорости и ускорению не должны превышать соответственно $C_1 = 0,004$ с, $C_2 = 0,05$ с²; в) длительность переходного процесса τ не должна превышать 0,5 с; г) относительное перерегулирование σ в переходном процессе не должно превышать 30%.

Перейдем к формированию желаемой ЛАХ согласно предъявляемым к системе требованиям. Для системы с астатизмом первого порядка определим первую сопрягающую частоту (контрольная точка), которая должна удовлетворять условию [2] $\omega_1 = C_1/C_2 = 0,2$ с⁻¹ ($T_1 = 5$ с). Далее, согласно (7) $T_2 > 3 + \varepsilon [3(1 + N^2)] - 1/K = 0,224$ с, где по требованию перерегулирования $\varepsilon = 0,1 < 0,3$, значение $N = -\pi/\ln \sigma = 1,36$, а показатель колебательности $M = -(\ln^2 \sigma - \pi^2)/2 = \ln \sigma = 1,048$. Выбираем $T_2 = 0,23$ с, а $T_3 = T_2 h = T_2 (M - 1) (M + 1) = 0,0054$ с.

Окончательно сформированная желаемая ЛАХ разомкнутой САУ имеет следующие постоянные времени: $T_1 = 5$ с, $T_2 = 0,23$ с, $T_3 = 0,0054$ с, $T_4 = 0,003$ с, а ее передаточная функция

$$W_*(s) = 300 (0,23s + 1) [s(5s + 1)(0,0054s + 1)(0,003s + 1)]. \quad (10)$$

Управление селективностью конкретного сложного многостадийного процесса окисления смеси углеводородов (газового бензина) в промышленных условиях проводилось по статистическим моделям, выражающим зависимость выхода целевого продукта от параметров процесса: состава сырья, температуры в реакционной зоне и времени пребывания в реакторе (или скорости расхода сырья). Опыт был реализован по схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ) [1]: количество факторов — $N = n^k$, эксперимент проводился на двух уровнях — $n = 2$, и количество факторов — $k = 3$. Температура в середине реактора z_1 менялась в диапазоне 173—179°С, расход шихты в реакторе z_2 — в диапазоне 4—7 т/ч, а состав шихты z_3 — 40—60% по легкой фракции. Изучали влияние этих факторов на содержание уксусной, муравьиной и пропионовой кислот в оксидате на выходе из реакторов. Каждый опыт повторялся 3 раза ($m = 3$).

Основные уровни $z_i^0 = (z_i^{\max} + z_i^{\min})/2$ и интервалы варьирования $\Delta z_i = (z_i^{\max} - z_i^{\min})/z$ при проведении опытов были следующие:

$$z_1^0 = 176^\circ\text{C}, \quad \Delta z_1 = 3^\circ\text{C}; \quad z_2^0 = 5,5 \text{ т/ч}, \quad \Delta z_2 = 1,5 \text{ т/ч};$$

$$z_3^0 = 50\%, \quad \Delta z_3 = 10\%.$$

Функции отклика $f = f(x_1, x_2, x_3)$, $\varphi = \varphi(x_1, x_2, x_3)$ и $\psi = \psi(x_1, x_2, x_3)$ соответственно для уксусной, муравьиной и пропионовой кислот определялись в виде уравнений регрессий с коэффициентами взаимодействия

$$\begin{aligned} f = & a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + \\ & + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varphi = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \\ & + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\psi = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_{12}x_1x_2 + c_{13}x_1x_3 + c_{23}x_2x_3 + c_{123}x_1x_2x_3. \quad (3)$$

От системы координат $\{z_i\}$ путем линейного преобразования перейдем к безразмерной системе координат $\{X_i\}$

$$x_i = (z_i - z_i^0) / \Delta z_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

и введем в ПФЭ столбец фиктивной переменной $x_0 = 1$. В каждой строчке матрицы средние значения выхода уксусной кислоты в оксидате получены по трем измерениям

$$f_j = \sum_{i=1}^m f_{ij} / m \quad (j = 1, 2, \dots, 8, \quad m = 3),$$

а дисперсия равна

$$S_j^2 = \sum_{i=1}^m (f_{ij} - f_j)^2 / (m - 1).$$

Дисперсия по критерию Кохрена для уровня значимости $P = 0,05$ и числа степеней свободы $r_1 = m - 1$, $r_2 = N$ однородны. Тогда дис-

дисперсия воспроизводимости определяется как средняя арифметическая

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n S_j^2}{n}, \quad n = 8, \text{ а ее число степеней свободы равно } N(m-1).$$

Коэффициенты уравнения регрессии определим по формуле

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} f_j}{n}, \quad (i = 0, 1, 2, 3, 1.2, 1.3, 2.3, 1.2.3),$$

а ошибку коэффициентов — $S_{a_i}^2 = S_{\text{воспр}}^2 / Nm$.

После исключения незначимых коэффициентов по критерию Стьюдента, уравнение регрессии (1) для уксусной кислоты примет вид (таблица)

$$\hat{f} = 30,8 - 0,6x_1 - 1,43x_2 + 1,12x_1x_2. \quad (5)$$

Дисперсия адекватности определялась по формуле

$$S_{a_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{f}_j - \bar{f})^2}{N - l},$$

где l — число значимых коэффициентов в (5). По критерию Фишера для $P = 0,05$, чисел степеней свободы дисперсии адекватности $r_1 = N - l$ и $r_2 = N(m - 1)$ удовлетворяется условие адекватности уравнения регрессии (5) эксперименту.

Аналогично, уравнения регрессии для муравьиной (2) и пропионо-вой (3) кислоты примут вид

$$\varphi = 10,91 - 0,49x_1 - 0,29x_2 - 0,36x_1x_2, \quad (6)$$

$$\psi = 5,81 - 0,54x_1 + 0,61x_2 - 0,33x_1x_2x_3, \quad (7)$$

которые также адекватны эксперименту.

Совместно решая (4)–(6), получаем уравнения в натуральных единицах измерения

$$f = 280,353 - 1,369z_1 - 14,204z_2 - 0,143z_3 + 0,249z_1z_2,$$

$$\varphi = 118,16 - 0,603z_1 - 14,273z_2 + 0,98z_1z_2,$$

$$\psi = -432,805 + 2,509z_1 + 68,444z_2 + 9,526z_3 - 0,389z_1z_2 -$$

$$- 0,05z_1z_3 - 1,369z_2z_3 + 0,008z_1z_2z_3,$$

где z_1 — температура в середине реактора, °С; z_2 — расход шихты в реакторе, т/ч; z_3 — содержание легкой фракции в шихте, %.

Проверка адекватности моделей проведена по данным работы реакторной системы С узла окисления газового бензина.

Таблица

Расширенная матрица планирования (ПЭФ 2³) и результаты измерений

№ опыта	Факторы в безразмерном масштабе								Выход продукта эксперим., вес %			Дисперсия S^2			Выход продукта расчеты, вес %			$(\bar{y}-\bar{y})^2$	$(\bar{f}-\bar{f})^2$	$(\bar{y}-\bar{f})^2$
	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	м. к.	у. к.	п. к.	м. к.	у. к.	п. к.	м. к.	у. к.	п. к.	м. к.	у. к.	п. к.
1	-	-	-	-	+	-	-	+	12,2	33,9	5,07	0,43	0,6	0,02	12,05	33,23	5,08	0,02	0,45	0,000
2	+	-	-	+	+	-	-	+	11,9	29,8	7,70	0,19	2,7	0,19	12,05	30,37	7,64	0,62	0,32	0,004
3	+	+	-	-	-	+	+	+	10,5	29,5	5,73	0,25	0,3	0,64	10,75	29,79	5,70	0,95	0,08	0,001
4	+	-	+	-	-	-	-	-	11,0	27,3	6,87	1,09	0,8	0,05	10,75	26,97	6,94	0,06	0,11	0,005
5	-	+	-	+	+	-	+	+	10,4	30,5	5,17	0,18	1,7	0,10	10,35	30,99	5,1	0,003	0,24	0,029
6	-	+	-	+	-	+	-	-	10,3	28,5	5,10	0,38	1,4	0,07	10,35	28,13	5,20	0,003	0,14	0,010
7	-	+	+	-	+	-	-	-	10,0	32,1	4,80	0,01	0,3	0,01	10,49	32,03	4,64	0,240	0,01	0,025
8	+	-	+	+	+	-	+	+	11,0	29,0	6,00	0,22	0,7	0,01	10,49	29,17	5,90	0,260	0,03	0,010

Примечания: \bar{y} — средние значения экспериментальных данных; \bar{f} — расчетные значения выходов кислот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Краковский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М: Наука, 1976. — 197 с.

ВЦ АН Армении

25. VIII. 1989

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIII, № 5, 1990, с. 237—241.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62.50

С. С. ЗАХАРЬЯН, Э. В. КАРСЯН, С. Е. ЧИМИШКЯН

ПРИНЦИП УПЛОТНЕНИЯ В ПРОБЛЕМЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОБАСТНЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ САР

Показано, что в основе довольно общей и результативной методологии рассмотрения многосвязанных систем автоматического регулирования (МСАР) лежит принцип уплотнения во временной или в частотной области. Указан способ получения на его основе ряда существующих частотных методов: метода характеристических топографов, аппарата главных передаточных функций с направлениями, принципа нормальной ковариантности и др.

Пл. 1. Блблнотр.: 5 назв.

Յուշը է արված, որ փոփոխականների խտացման սկզբունքը մեծածախային կամ նախափական տիրույթում բազմակապ ավտոմատ կարգավորման նամակարգերի (ՄՍԱՐ) ուսումնասիրման բազմակամի բնութանուր և արդյունավետ մեթոդիկայի խորք է նախդասնում Յուշը է արված նաև ինչպես անգնել աղ սկզբունքից մի շարք հայտեր նախափական մեթոդների, որիևկ՝ բնութագրային տողորաֆների մեթոդի, գլխավոր փոխանցման ֆունկցիաների և գրականոր աղբյուրյունների մեթոդի, նորմալ դերիվատիվյան սկզբունքի և այլն:

В настоящее время у разработчиков систем автоматики возникают серьезные проблемы при автоматизации многосвязанных объектов. Многообещающими являются методы рассмотрения многосвязанных систем автоматического регулирования (МСАР), позволяющие разложить многомерную задачу на ряд относительно независимых. К последним можно применить классические методы теории систем «один вход—один выход», что облегчает процедуру анализа и синтеза.

Рассмотрим характерные для практических задач МСАР с одинаковым числом входов и выходов m , изображенные на рис. 1, где $G(s)$, $\Lambda(s)$ и $W(s)$ —передаточные матрицы (ПМ) линеаризованного объекта, линейного компенсатора и линейной части разомкнутой системы, а BH_1 и BH_2 —блоки статических секторных нелинейностей, учитывающие нелинейности датчиков и неполнотельных органов. Цель работы—показать на примере таких систем, как многие распространенные методы рассмотрения МСАР, не использующие описанный выше прием разложения многомерной задачи, вытекают из принципа уплотнения, дающего весьма общую методологию исследования МСАР [1].

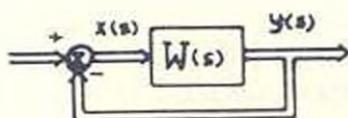
Пусть имеется некоторая динамическая линейная система с оператором W , определяющая преобразование m -мерного вектор-столбца входов $x(t)$ из пространства X в m -мерный вектор-столбец выходов $y(t)$ из пространства Y

$$W: x(t) \rightarrow y(t), \quad x(t) \in X, \quad y(t) \in Y \quad (y(s) = W(s) x(s)) \quad (1)$$

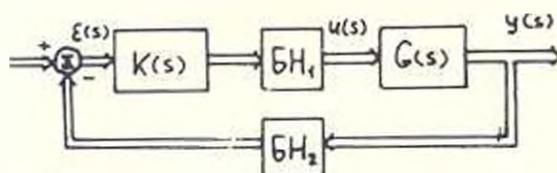
и некоторая линейная динамическая система с оператором W_{yn} , осуществляющая преобразование обратной направленности

$$W_{yn}: y_{yn}(t) \rightarrow x_{yn}(t), \quad y_{yn}(t) \in Y, \quad x_{yn}(t) \in X, \quad (2)$$

$$(x_{yn}(s) = w_{yn}(s) y_{yn}(s)).$$



а.



б.

Рис. Структурные схемы рассматриваемых многосвязных САР:
а) линейная САР, б) нелинейная САР.

Определим новые, уплотненные переменные $w_x(t)$ и $w_y(t)$ как проекции векторов $x(t)$ и $y(t)$ на уплотняющие переменные $x_{yn}(t)$ и $y_{yn}(t)$

$$w_x(t) = y_{yn}(t)^T x(t), \quad w_y(t) = y_{yn}(t)^T y(t), \quad (3)$$

$$(w_x(s) = x_{yn}(s)^* x(s), \quad w_y(s) = y_{yn}(s)^* y(s)).$$

при этом система (2) определяет уплотняющие процессы $x_{yn}(t)$ и $y_{yn}(t)$. Согласно принципу уплотнения [1], если выбрать в качестве уплотняющего оператора

$$W_{yn} = W^T \quad (W_{yn}(s) = W(s)^*), \quad (4)$$

то имеет место баланс уплотненных переменных

$$w_x(t) = w_y(t) = w(t) \quad (w_x(s) = w_y(s) = w(s)). \quad (5)$$

Выражения (1) — (5) записаны для оригиналов (временных функций), а выражения в скобках соответствуют изображениям Лапласа.

С одной стороны, уплотненная переменная (5) является функционалом, несущим информацию о свойствах многомерной системы. С другой стороны, именно выражение (5) является фундаментом для целого ряда методов, разбивающих многомерную задачу на одномерные. По существу, вышеприведенный принцип вытекает из одной из основных теорем функционального анализа — теоремы Рисса [2].

Покажем, как следует пользоваться принципом уплотнения. Поскольку при рассмотрении САР «один вход — один выход» вида, изображенного на рис. 1, наибольшее распространение получили частотные методы, далее будем использовать принцип уплотнения в частотной области (в выражениях (1) — (5) подставляя $s = j\omega$). Наиболее ответственным моментом является рациональный выбор уплотняющих переменных $x_{yn}(j\omega)$ и $y_{yn}(j\omega)$, обеспечивающий наибольшую информативность уплотненных переменных (при исследовании различных свойств МСАР этот выбор будет различным). Например, если выбрать

$$x_{yn}(j\omega) = [0 \ 0 \dots 1 \dots 0]^T, \quad y_{yn}(j\omega) = [0 \ 0 \dots 1 \dots 0]^T,$$

то получим ij -ый элемент передаточной матрицы (ПМ) $W(j\omega)$, т. е. $w(j\omega) = w_{ij}(j\omega)$.

В квазиклассическом методе исследования МСАР на основе характеристических годографов [3] в качестве уплотняющих переменных используются собственные векторы $c_i(j\omega)$ и векторы двойственного базиса $c_i^*(j\omega)$ частотной ПМ $W(j\omega)$

$$x_{yn}(j\omega) = c_i(j\omega), \quad y_{yn}(j\omega) = c_i^*(j\omega), \quad i = \overline{1, m},$$

а уплотненные переменные $w_i(j\omega)$ и есть характеристические годографы. Здесь

$$W(j\omega) c_i(j\omega) = w_i(j\omega) c_i(j\omega), \quad i = \overline{1, m},$$

$$c_i^*(j\omega) c_i(j\omega) = \begin{cases} 1, & i = k, \\ 0, & i \neq k, \end{cases}$$

В последнее время при проектировании МСАР особое внимание уделяется робастности системы, т. е. способности сохранять свои свойства при неопределенностях (вариациях) характеристик из-за неточностей моделей, нестационарности и др. В работе [4] описана квазиклассическая методика проектирования робастных МСАР вида рис. 1б, где BN_1 (BN_2) не имеют перекрестных связей. В основе методики лежит концепция нормализации частотной ПМ разомкнутой системы $W(j\omega)$ с помощью нормализующего компенсатора $K(j\omega)$

$$W(j\omega) * W(j\omega) = W(j\omega) W(j\omega)^*, \quad 0 < \omega < \infty, \quad (6)$$

где $W(j\omega) = G(j\omega)K(j\omega)$ либо $W(j\omega) = K(j\omega)G(j\omega)$. При этом нормальность (6) обеспечивает МСАР лучшие свойства робастности, динамического и статического качества и др.

Желаемая частотная ПМ компенсатора имеет вид

$$K(j\omega) = \sum_{i=1}^m (\widehat{v}_i(j\omega) \widehat{z}_i(j\omega)^*) \widehat{k}_i(j\omega),$$

если объект имеет соответствующее разложение

$$G(j\omega) = \sum_{i=1}^m (\widehat{z}_i(j\omega) \widehat{v}_i(j\omega)^*) \widehat{g}_i(j\omega),$$

и желаемые характеристические подографы $\widehat{w}_i(j\omega)$ разомкнутой системы определяются как $\widehat{w}_i(j\omega) = \widehat{k}_i(j\omega) \widehat{g}_i(j\omega)$, $i = \overline{1, m}$. Здесь $\widehat{g}_i(j\omega)$, $\widehat{k}_i(j\omega)$ — главные передаточные функции, а $\widehat{v}_i(j\omega)$ и $\widehat{z}_i(j\omega)$ — m -векторы входных и выходных главных направлений объекта.

Проектирование МСАР сводится фактически к синтезу абстрактных одномерных систем $\widehat{w}_i(j\omega)$ классическими частотными методами (метод ЛАЧХ и др.), обеспечивающими в совокупности желаемые свойства.

Фактически главные передаточные функции $\widehat{g}_i(j\omega)$ — это уплотненные переменные (5), соответствующие специфичному выбору уплотняющих переменных $x_{j_i}(j\omega) = v_i(j\omega)$, $y_{j_i}(j\omega) = z_i(j\omega)$, где главные направления $\widehat{v}_i(j\omega)$ и $\widehat{z}_i(j\omega)$ совпадают с точностью до общего аргумента с правыми и левыми сингулярными векторами матрицы $G(j\omega)$ [4].

Заметим, что нормальность (6) — крайне редкое свойство, практически недостижимое даже при методе проектирования на основе нормализующего компенсатора из-за погрешностей реализации последнего. Правильнее говорить о «близости» к нормальности, т. е. квазинормальности, или нормальной доминантности.

Представим ПМ $W(j\omega)$ в виде суммы нормальной части $W_n(j\omega)$ и погрешности $W_e(j\omega)$ $W(j\omega) = W_n(j\omega) + W_e(j\omega)$, где $W_n(j\omega)$ — решение минимизационной задачи

$$\min_{W_n(j\omega)} \|W(j\omega) - W_n(j\omega)\|, \quad W_n(j\omega)^* W_n(j\omega) = W_n(j\omega) W_n(j\omega)^*.$$

Тогда отклонение свойств нормальной части $W_n(j\omega)$ от реальной ПМ характеризуется величиной показателя нормальной доминантности

$$l(\omega) = \frac{\|W(j\omega) - W_n(j\omega)\|}{\min_i \|1 + W_{ni}(j\omega)\|},$$

что явствует из принципа нормальной доминантности [5]. Здесь $W_{ni}(j\omega)$ — характеристические подографы нормальной части $W_n(j\omega)$.

В описанной методике проектирования на основе нормализующего компенсатора принцип нормальной доминантности позволяет оценить

допустимую погрешность реализации нормализующего компенсатора, исходя из желаемых свойств МСАР. Фактически же принцип нормальной доминантности — результат применения принципа уплотнения к «доминантной», определяющей части МСАР (ее нормальной части).

ЛИТЕРАТУРА

1. Арцинян Г. Э., Зикарян С. С., Маланджян Г. А. Два метода повышения эффективности сложных технологических процессов — Ереван: Адастан, 1983. — 161 с.
2. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. — М.: Наука, 1981. — 543 с.
3. MacFarlane A. G. J. Frequency-response methods in Control systems. — New-York: Wiley, 1979. — 523 p.
4. Карелин Э. В., Чимшикян С. Е. Синтез робастных многосвязных САУ на основе главных передаточных функций и направлений // Изв. вузов СССР. Приборостроение. — 1988. — № 2. — С. 49—57.
5. Чимшикян С. Е. Нормально доминантные многосвязные системы и их анализ // Изв. вузов СССР. Электромеханика. — 1988. — № 4. — С. 95—96.

ЕрПН

7 X 1988

Изв. АН Армянской ССР (сер. ТН), т. XLIII, № 5, 1990, с. 241—245.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62—50:658.5

В. В. ОВСЕЯНИ

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КОРНЕВЫХ ГОДОГРАФОВ ЛСМСАР, ОСНОВАННАЯ НА СВЕДЕНИИ ПРОБЛЕМЫ К ЗАДАЧЕ КОШИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Предлагается методика построения корневых годографов линейных стационарных многосвязных систем автоматического управления квадратного типа, основанная на сведении проблемы к задаче Коши второго порядка. Приводятся несколько утверждений, позволяющих перейти от символических преобразований многомерных временных к простейшим численным преобразованиям над вещественными матрицами.

Библиогр.: 2 назв.

Առաջարկվում է շտապիտասի տիպի գծային սեփական բազմազան պետական կարգավորման ամպլիտուդային օպտիմալիզացիայի հարցում համակարգերի արժանատիների օպտիմալիզացիայի կառուցման մեթոդիկա՝ իմպուլսային երկրորդ կարգի խնայող լուծման վրա: Բերվում են մի քանի պնդումներ, որոնք հնարավորություն են տալիս երկու փոփոխականների բազմանդամների սրբու կիսային մեթոդաբանական փոխարինելի իրական մատրիցաների օպտիմալիզացիայի վրա:

При автоматизированном проектировании многосвязных систем автоматического регулирования (МСАР) часто приходится рассматривать вопросы устойчивости и качества систем в зависимости от некоторого параметра и, в частности, целенаправленного выбора значения этого параметра. При этом можно использовать методику построения корневых годографов (КГ).

Рассмотрим линейную стационарную МСАР квадратного типа с числом входов-выходов, равным m . Пусть $W(s)$ и $F(s)$ — матричные передаточные функции соответственно прямого и обратного каналов, причем $F(s)$ — скалярная матрица вида

$$F(s) = \text{diag} \{k, k, \dots, k\} = \text{diag} \{-k^{-1}, -k^{-1}, \dots, -k^{-1}\},$$

где $\lambda = -k^{-1}$, $\lambda \in K$ и $k \in R$.

Характеристическое уравнение этой системы имеет вид

$$\text{или} \quad \det |\lambda I - W(s)| = 0$$

$$U(\lambda, s) = P_0(\lambda) s^n + P_1(\lambda) s^{n-1} + \dots + P_{n-1}(\lambda) s + P_n(\lambda) = 0, \quad (1)$$

где $P_i(\lambda)$, $i = 0, 1, \dots, n$ — многочлены от λ степени, не превышающей числа m , причем степень хотя бы одного из многочленов $P_i(\lambda)$ действительно равна m . Кроме того, предположим, что многочлен двух переменных $U(\lambda, s)$ непринормален и $P_0(\lambda) \neq 0$. Таким образом $U(\lambda, s)$ — многочлен степени n относительно s и степени m относительно λ .

Рассмотрим КГ системы при изменении общего для всех каналов коэффициента k обратной связи. Известные методы построения КГ [1, 2] для выбранного класса ЛМСАР сложны и требуют больших вычислительных затрат. В предлагаемой работе проблема построения КГ сводится к решению задачи Коши второго порядка.

Запишем уравнение (1) в матричной форме

$$U(\lambda, s) = \bar{s} A \bar{\lambda} = 0, \quad (2)$$

где $\bar{s} = [s^0, s^1, \dots, s^n]$, $\bar{\lambda} = [\lambda^0, \lambda^1, \dots, \lambda^m]^T$, а $A = \|a_{ij}\|$ — действительная матрица размерности $(n+1) \times (m+1)$, причем i -я строка получается из коэффициента многочлена $P_{n-i+1}(\lambda)$, если записать их по возрастающим степеням λ .

Подставляя в (1) $-k^{-1}$ вместо λ , получаем

$$U(\lambda, s) = Y(-k^{-1}, s) = k^{-m} \gamma(k, s) = 0.$$

В дальнейшем вместо уравнения $U(\lambda, s) = 0$ будем рассматривать $\gamma(k, s) = 0$. Последнее уравнение можно записать в виде

$$\gamma(k, s) = \varphi_n(k) s^n + \varphi_1(k) s^{n-1} + \dots + \varphi_{i-1}(k) s^{i-1} + \dots + \varphi_n(k) \quad (3)$$

или же в матричной форме

$$\gamma(k, s) = \bar{s} B \bar{k}, \quad (4)$$

где $\bar{k} = [k^0, k^1, \dots, k^m]^T$, а $B = \|b_{ij}\|$ — матрица той же размерности, что и A , причем она получается из матрицы A перестановкой ее столбцов в обратной последовательности с дальнейшим умножением элементов столбцов полученной матрицы с четными номерами, считая справа, на -1 .

Решение уравнения (3) относительно s для действительных неотрицательных k определяет многозначную алгебраическую функцию $s(k)$, определяющую зависимость полюсов замкнутой системы от k , т. е. КГ системы. В общем случае этот годограф имеет n ветвей, если не существуют ветвей, состоящих из одной единственной точки. Уравнение (3) определяет функцию $s(k)$ неявным образом и получить из нее вид функции в явном виде практически невозможно. Применим известную теорему о существовании неявной функции. Продифференцировав (3) как сложную функцию, найдем

$$\gamma'_k + \gamma'_s \frac{ds}{dk} = 0$$

или отсюда

$$\frac{ds}{dk} = -\frac{\gamma'_k}{\gamma'_s}. \quad (5)$$

Производная ds/dk не существует при тех значениях k и s , при которых $\gamma'_s = 0$. Частные производные γ'_k и γ'_s представляют собой полиномиальные функции двух переменных k, s и их также можно представить в матричной форме

$$\gamma'_k = H_1(k, s) = \bar{s}_1 B_1 \bar{k}_1 \quad (6)$$

$$\gamma'_s = H_2(k, s) = \bar{s}_2 B_2 \bar{k}_2. \quad (7)$$

Совместно решая (5) — (7), получаем

$$\frac{ds}{dk} = -\frac{H_1(k, s)}{H_2(k, s)} = -\frac{\bar{s}_1 B_1 \bar{k}_1}{\bar{s}_2 B_2 \bar{k}_2}. \quad (8)$$

Ниже приводятся два утверждения, позволяющие от матрицы B , входящей в (4), легко перейти к B_1 и B_2 , используя простейшие преобразования над вещественными матрицами.

Утверждение 1. При дифференцировании $X(k, s)$ по s получается матрица B_2 , которую можно получить из B отбрасыванием первой строки и умножением элементов строк вновь полученной матрицы на номера их строк. При этом $\bar{k}_2 = \bar{k}$, $\bar{s}_2 = [s^0, s^1, \dots, s^{n-1}]$.

Доказательство. Дифференцируя многочлен $\gamma(k, s)$ по s , получаем

$$\gamma'_s(k, s) = n\varphi_n(k) s^{n-1} + \dots + i\varphi_{n-1}(k) s^{l-1} + \dots + \varphi_{n-1}(k). \quad (9)$$

Коэффициент $i\varphi_n(k)$ при s^{l-1} в формуле (9) представляет собой скалярное произведение i -ой строки матрицы B_2 и \bar{k} . Он получается умножением i на $\varphi_{n-1}(k)$, являющийся в свою очередь скалярным произведением $(i+1)$ -ой строки матрицы B и \bar{k} , что доказывает правильность рассуждений.

Аналогичным образом доказывается и второе утверждение.

Утверждение 2. При дифференцировании $X(k, s)$ по k получается матрица B_1 , которую можно получить из B отбрасыванием первого

столбца и умножением элементов столбцов вновь полученной матрицы на номера их столбцов. При этом $\bar{s}_1 = \bar{s}$, $\bar{k}_1 = |k^0, k^1, \dots, k^{n-1}|^T$.

Учитывая, что $s \in C$, т. е. $s = x + jy$ и $k \in R$, из (8) определяем

$$\begin{cases} \frac{dx}{dk} = \operatorname{Re} \left[- \frac{\bar{s} B_1 \bar{k}_1}{s_1 B_2 k} \right] \\ \frac{dy}{dk} = \operatorname{Im} \left[- \frac{\bar{s} B_1 \bar{k}_1}{s_1 B_2 k} \right] \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, мы получили задачу Коши второго порядка. Начальные условия легко получаются из того свойства КГ, что при $k = 0$ ветви выходят из полюсов разомкнутой системы.

Существующие алгоритмы и программы решения задачи Коши предполагают непрерывность правых частей системы (10) в интервале интегрирования. В кратных точках многозначной алгебраической функции $s(k)$ нарушается непрерывность правых частей (10), т. е. эти точки одновременно удовлетворяют уравнениям $\chi'_s = 0$ и (3). Как известно, эти точки принадлежат дискриминантному множеству уравнения (3) и могут быть найдены решением уравнения

$$D(k) = R(\chi, \chi'_s) = 0, \quad (11)$$

где $D(k)$ — дискриминант многочлена $\chi(k, s)$, а R — результат двух многочленов χ и χ'_s .

При решении задачи (10) использована известная программа RKF45, которая вблизи вышеуказанных кратных точек $s(k)$ выдает ключ FLAG=6, указывая на наличие особой точки, и приостанавливается. В работе [1] точки корневого голографа ЛСМСАР находятя следующим образом. Интересующая область плоскости s сканируется по точкам сетки, покрывающей эту область, по горизонтали и вертикали и находятся те точки s , для которых хотя бы одно из собственных значений комплексной матрицы $W(s)$ является вещественным. Там же доказывается правомерность этого метода для нахождения точек КГ. Следовательно, для продолжения работы программы RKF45 предлагается задавать новые начальные условия, обходя особые точки по окружности малого радиуса против часовой стрелки. Окружность сканируется по точкам с определенным небольшим шагом до тех пор, пока не встретится новая точка КГ. В этой точке хотя бы одно из собственных значений комплексной матрицы W должно быть вещественным. Используя в качестве начальных условий последовательно все полюсы разомкнутой системы при $k=0$, можно построить графики всех ветвей КГ.

Предложенная методика построения КГ ЛСМСАР доведена до программной реализации на языке ФОРТРАН-77.

1. *Edmunds J. M.* Characteristic gains, characteristic frequencies and stability // *Int. J. Control.* — 1979 — Vol. 29, № 4. — P. 669—706.
2. *Асенов В., Нара Т., Такумару Н.* Алгоритмы для вычисления многомерных кинематических диаграмм с помощью прращения // *Экспресс-инф. ВИННИТ. САЗ.* — 1986. — № 6. — С. 1—7.

ЕрПН

10. VIII. 1989

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIII, № 5, 1990, с. 245—248.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.314.26

Э. В. КАЗАРЯН Г. Г. КОЛОЗЯН, Г. А. КАЗАРЯН

К ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ
СРЕДСТВ НА МАГНИТНОМ ПОДВЕШИВАНИИ

Рассматривается решение задачи, связанное с надежностью транспортной системы на магнитном подвешивании (ТСМП) путем моделирования процесса движения. Приводятся аналитические прогнозирование и диагностирование надежности, что позволяет избежать выполнения дорогостоящих экспериментов.

Ил. 2. Библиогр.: 4 назв.

Դասակարգում և մոդելավորում կախարդ սրահափոխակի համակարգի հուսալիության հետ կապված խնդրի լուծումը շարժման պրոցեսի մոդելավորման էզանակով: Հուսալիության փորձարկումը և հանձնարանները իրագործվում է վերլուծական էզանակով, որը նպաստում է խնայող և արագ լուծումներ կատարել մանկարդի փորձարարական աշխատանքներին:

В настоящее время большое внимание уделяется конструированию и проектированию новых транспортных средств, в том числе транспортных систем на магнитном подвешивании (ТСМП). Решение задач, связанных с разработкой ТСМП, требует проведения различных исследовательских и экспериментальных работ, измерений, контроля и, прежде всего, крупномасштабных экспериментов. В течение последних лет достигнуты значительные успехи в области ТСМП [1, 2]. В частности, всесторонне исследованы системы электромагнитного подвешивания, линейные электродвигатели, системы торможения и движения в случае наличия неисправностей, передачи электроэнергии и комплексные системы, состоящие из экипажа. В работах [3, 4] рассматривается комплексное изучение мультимодальной модели водителя и транспортных средств, позволяющее на основе известных взаимосвязей или обработки статистической информации определить важные факторы движения, границы скоростей и ускорений, а также связанные с ними расходы топлива на единицу пути. Данный подход позволяет не только изучить поведение транспортного средства при влиянии внешней среды, но и дает возможность оценить и определить надежность в условиях эксплуатации. Однако до настоящего времени мало исследованы вопросы надеж-

ности транспорта на магнитном подвешивании. Количественные определения показателей надежности ТСМП представляют значительные трудности как в теоретическом, так и в прикладном плане. Необходимым требованием к проведению испытаний на надежность является полный учет факторов, воздействиям которых подвергается ТСМП при эксплуатации. К основным параметрам ТСМП могут быть отнесены: скорость и интенсивность движения, параметры трассы (радиус, участок максимальной скорости, максимальный уклон пути, крутизна пути в плане и др.), которые рассмотрены в [3, 4]. Наконец, надежность ТСМП зависит от структуры самой системы и ее компонентов, а также методов технической диагностики, позволяющих своевременно производить профилактические осмотры, техническое обслуживание и ремонт.

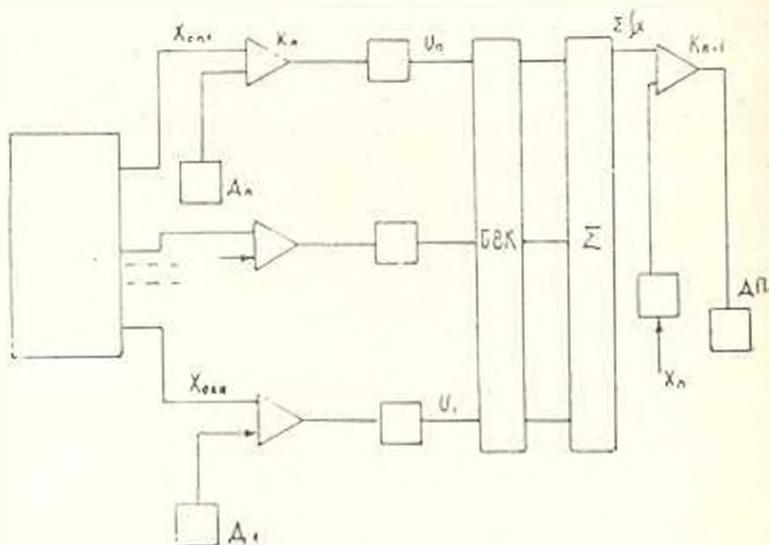


Рис. 1.

Предлагается метод диагностики, позволяющий на основе информации о контролируемом объекте в процессе эксплуатации получить статистические данные в течение времени работы объекта в различных режимах и при отклонении параметра оценить потенциальный ресурс объекта, а также сроки проведения профилактических мероприятий.

Допустим диагностируемый объект (ТСМП) функционирует нормально, тогда его контролируемые параметры, например, отклонение величины вертикального воздушного зазора от заданного значения, температура, мощность двигателей и др. находятся в поле допуска, т. е.

$$X_{\text{нн}i} = X_{\text{ном}i} + \Delta X_i (\Delta X_i < \Delta X_{\text{ном}}), \quad (1)$$

где $X_{\text{нн}i}$ — значение контролируемого параметра, $X_{\text{ном}i}$, ΔX_i — номинальное значение и величина отклонения параметра.

На рис. 1 приведено устройство диагностической информации, которое состоит из источников опорных сигналов $X_{\text{нн}i}$, датчиков D_1 — D_n

компараторов K_1, \dots, K_n , интеграторов I_1, \dots, I_n , блока весовых коэффициентов (БВК), сумматора Σ , компаратора K_{n+1} и выходного устройства (например, дисплея). Опорные сигналы на одном из двух входов компараторов равны

$$X_{\text{опт}} = X_{\text{ном}}, \quad (2)$$

поэтому на выходе компараторов соответственно будем иметь

$$\Delta X_{\text{вых}i} = X_{\text{ном}i} - X_{\text{опт}} = \Delta X_i. \quad (3)$$

Соответственно на выходе каждого интегратора имеется сигнал

$$X_{\text{инт}i} = \int_0^{t_p} dX_i dt \Big|_{t=1 \text{ до } t=n}, \quad (4)$$

где t_p — время назначенного ресурса диагностирующего объекта.

Сигналы $X_{\text{инт}i}$ поступают в блок весовых коэффициентов (БВК), в котором учитывается степень важности соответствующего параметра. Выходные сигналы БВК поступают в сумматор Σ , а выход сумматора подключен к первому входу компаратора $\Sigma \int \Delta X_i dt$. На

второй вход компаратора при этом поступает сигнал $\sum_{i=1}^n \int_0^{t_p} \Delta X_{\text{ном}i} dt$ от

источника опорных сигналов ($\Delta X_{\text{ном}i}$ — отклонение i -ого параметра). Наличие сигнала на выходе компараторов K_1, \dots, K_n свидетельствует об отклонении контролируемого параметра за допустимые пределы.

На рис. 2 показаны временные диаграммы изменения интегральных значений параметров и самих параметров диагностируемого объекта. На участке ОА отклонения параметров находятся в поле допуска: $X_{\text{н}X} \leq \Delta X_{\text{доп}}$ и на выходе масштабного усилителя имеется

сигнал, пропорциональный $\sum_0^{t_p} \Delta X_{\text{н}X} dt$, т. е. характеристика находится в пределах (1), которая определяется выражением

$$X_{\text{н}X} = \sum_{i=1}^n \int_0^{t_p} X_{\text{н}X} dt, \quad (5)$$

и на участке АВ наблюдается отклонение параметров. Уровень прогнозирования $X_{\text{уп}}$ определяет предельно допустимую величину суммарных отклонений параметров.

Устройство диагностики ТСМП и предложенная методика дают возможность оценить показатели надежности с применением диагности-

рования не с точки зрения результатов экспериментальной обработки информации, а решения задач на ЭВМ и определения параметров, избегая выполнения дорогостоящих экспериментов.

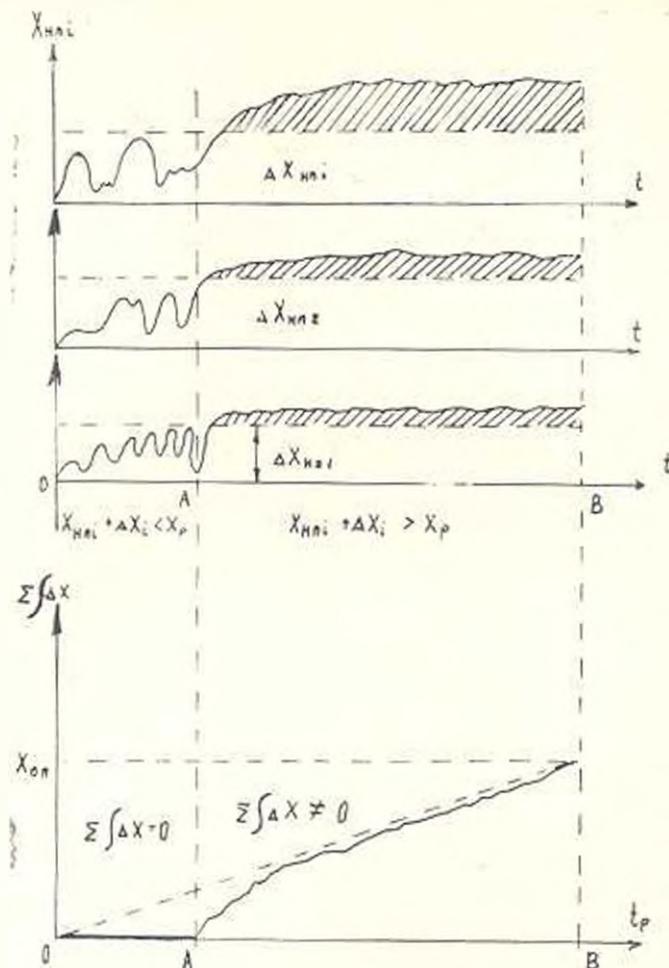


рис. 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривинер Г., Писарь К. Эксперименты и области транспорта на магнитном подвешивании на установке ТРАНСРАПИД 01 и линейном высокоскоростном испытательном столе // *Clasiers Anali.*—1978.— № 2.— С. 33—44.
2. Аппар П., Турн Г. Ю. Электромагнитная система подвешивания и направления для подвижного состава высокоскоростного направляемого транспорта // *Elektrische Bahnen.*—1975.— № 4.— С. 86—94.
3. Нилчаджян Т. А., Колодия Г. Г. О построении минимаксной модели водителя транспортных средств // *Промышленность Армении.*—1984.— № 11.— С. 11—18.
4. Колодия Г. Г., Нилчаджян Т. А. К вопросу создания современных энергоэффективных автомобилей // *Промышленность Армении.*—1984.— № 9.— С. 10—16.

УДК 621.313.333

И. Г. ШИКИЯН, И. Э. БАРСЕГЯН

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭКЦЕНТРИСИТЕТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Устройство позволяет с достаточной точностью измерить силу одностороннего магнитного притяжения и содержит блок ротора и статора испытываемой машины, корпус устройства, блок регулирования эксцентриситета, блоки нагрузки и измерения. Описан принцип работы устройства.

Ил. 3. Библиогр.: 4 назв.

Համաարքը նարադարձիչուն է ապին բաժանմանաբ հարաբերակ ընկել միակողմանի մագնիսական ձգողության ուժը, պարունակում է փորձարկիչը սեղանով ստատորի և ռոտորի հանգույցները, սարքավորման իրանը, ապակենարձեղյակն ճարտարագիտական ընտրի և չափման հանգույցները, նկարագրված է համաարքի աշխատանքի սկզբունքը:

В электрических машинах вследствие эксцентричного положения ротора возникает сила одностороннего магнитного притяжения (ОМП), которая может достигать значительной величины и играет важную роль при расчете подшипников и валов. Расчет силы ОМП в настоящее время может быть выполнен по нескольким существующим методикам [1]—[3]. Исследования показали, что результаты расчетов в значительной степени отличаются друг от друга (рис. 1). Существующие устройства для определения силы ОМП имеют сложную конструкцию и не позволяют надежно определить ее величину.

В статье описано сравнительно простое устройство [4], которое позволяет достаточно точно измерить силу ОМП. Это достигается тем, что ротор и статор механически развязаны, а статор имеет возможность перемещаться по линии действия силы (рис. 2, 3). Устройство содержит блок ротора и статора испытываемой машины, корпус устройства, блок регулирования эксцентриситета, блоки нагрузки и измерения. Блок ротора содержит ротор 1, вал 2 которого установлен в подшипниках 3 и 4. Блок статора состоит из шихтованного сердечника 5, запрессованного в цилиндрическую станину 6, поверхности «а» и «б» которой обработаны коаксиально с поверхностью отверстия статора. К станине приварены верхняя 7 и нижняя 8 проушины. Верхняя проушина 7 образует шарнир 9 с горизонтальным рычагом 10, который одним своим концом посредством шарнира 11 соединен с корпусом 12 устройства, а другим — опирается на шпильку 13, конец которой имеет вид призмы. Проушины 8 образуют соосные шарниры 14 совместно с горизонтальной тягой 15, посредством которой через шарнир 16 статор связан с корпусом. Конструкция блока статора допускает перемещения только в вертикальном направлении. Блок регулирования эксцентриситета со-

стоит из стакана 17, в полости которого помещен стержень 18 и на нем установлена шпилька датчика перемещений рычага 10. Гайка 19 соединена со стержнем 18 и опирается на торец стакана 17. Блок нагрузки состоит из машины постоянного тока 20, которая соединена с испытуемой машиной посредством упругой муфты 21. Блок измерения состоит из приборов, измеряющих напряжения, токи, мощность и электрическое сопротивление тензодатчика 24.

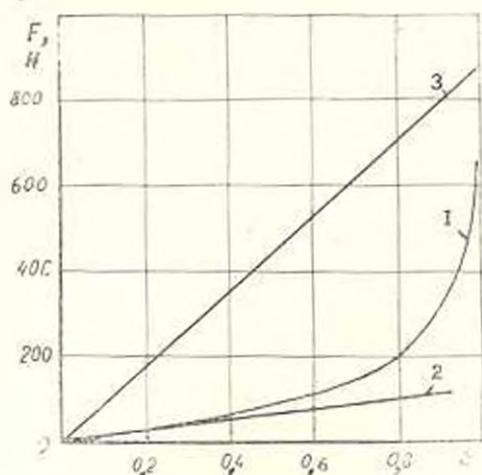


Рис. 1. Расчеты с значениями силы $\sigma_{\text{ЛП}}$ для двигателей 4А/63А2 (570 Вт, 2800 об/мин) по методикам 1 — [1], 2 — [2], 3 — [3].

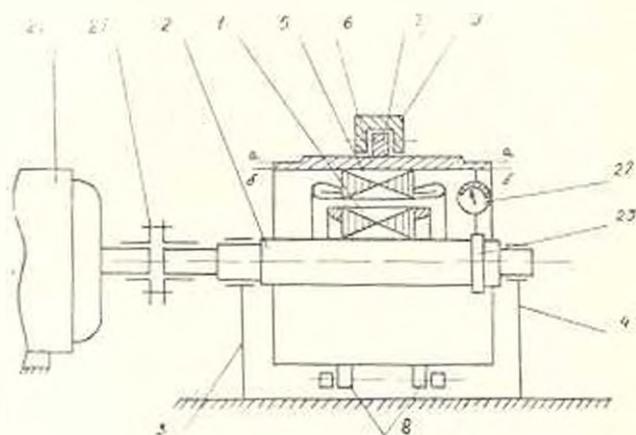


Рис. 2. Продольный разрез устройства для исследования эксцентриситета.

Устройство работает следующим образом. Вращением гайки 19 опускают точку опоры, смещая конец рычага 10. Абсолютную величину эксцентриситета измеряют по смещению призматического конца шпильки, зная размеры плеч рычага. Проверяют величину эксцентриситета с помощью индикатора, который временно закрепляют на валу

с помощью хомута. В результате смещения конца рычага воздушный зазор испытуемой машины в верхней точке становится минимальным. Возникающая сила ОМП действует по вертикали на статор и ротор в одинаковой мере, но в противоположных направлениях. Однако ротор закреплен на жестких опорах, статор же стремится сместиться вниз по вертикали и через конец рычага 10 оказывает давление на шпильку 13. На шпильке приклеен проволочный тензодатчик, с помощью которого измеряется деформация шпильки, пропорциональная силе давления.

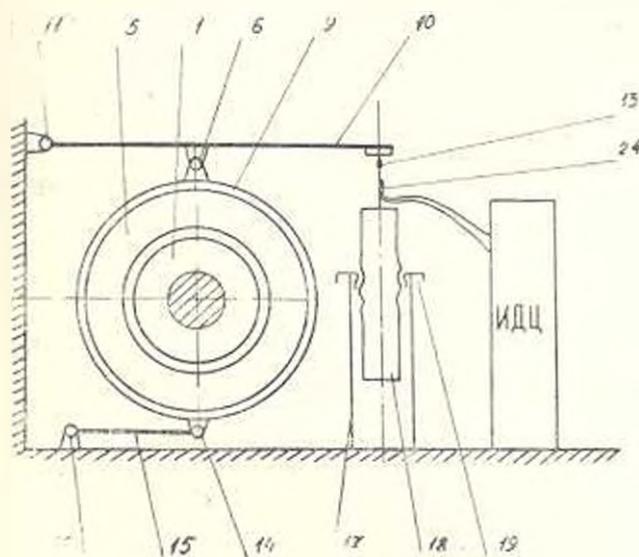


Fig. 3. Kinematic scheme of the device

If the current in the stator winding is absent, the pressure on the spindle 13 is caused only by the weight of the stator together with the lever 10 and the weight 15. When the current appears, a force of attraction arises, which in the proposed device is directed in the same direction as the weight of the stator. The balancing of the measuring instrument can be used to eliminate the influence of the weight of the stator.

The described device allows to study the influence of eccentricity on the characteristics of the machine, as well as on the time of its start. It allows to measure the force of OMP both at no-load and at load. The device is designed for the study of asynchronous motors of the type АИР80А2 (1.5 кВт, 3000 об/мин) and АИР80А1 (1.1 кВт, 1500 об/мин). When the size of the bearing holes and the end rings is changed, it can also be used for the measurement of the force of OMP and other types of machines.

The results of the study allow to establish the permissible limits of eccentricity from the point of view of the change of characteristics, increase of the start time and the pressure on the spindle and the change of the service life of the machine. The reliable value of the force of OMP at the design stage will allow to determine the minimum diameter of the shaft under the condition of permissible distortion of the gap from the deflection of the shaft.

1. Галлер В., Голата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах.— М.: Энергия, 1981—220 с.
2. Шийский В. П. Расчет электрических машин.— М.: Энергия, 1968.—732 с.
3. Копылов И. П. Проектирование электрических машин.— М.: Энергия, 1980.—496 с.
4. А с. 1164254 СССР МКИ G 01 R 31/34 Устройство для исследования влияния эксцентриситета на характеристики электрических машин. / Никитян Н. Г. (СССР) № 1257993/22; Заяв. 25.12.87; Опубл. 7.03.89. Бюл. № 9.—241 с.

ЕрПН

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIII, № 5, 1990, с. 252—255.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.382.333

Г. Е. АПВАЗЯН, А. Г. БАХШЕЦЯН, Г. А. МАКАРЯН

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ НА КАЧЕСТВО
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Показана корреляция между структурными дефектами, в частности, дислокациями на линиях скольжения, и электрическими характеристиками высоковольтных транзисторов. Предложен способ повышения качества транзисторов серии ТК.

Изл. 1. Библиогр.: 3 назв.

Նշանակում է արված հետազոտությունը արանդիտրոնների, մասնագրություն, ստորի գծերի վրա երբևէ դիսլոկացիաների, և շարժման արանդիտրոնների էլեկտրական չեղարկների միջև կապը: Առաջարկված է 59 շարժի արանդիտրոնների որակի բարձրացման մե կոչանակ:

Известно, что индуцированные термической обработкой структурные дефекты, в частности, дислокации на линиях скольжения (ЛС), отрицательно влияют на электрические характеристики интегральных схем и полупроводниковых приборов [1]. В ряде работ описана кристаллография ЛС, указаны отдельные причины, способствующие их возникновению и распространению [2, 3]. Там же перечислены конкретные способы ликвидации, или предотвращения образования дислокаций. Однако эти способы не всегда являются оптимальными применительно к созданию полупроводниковых приборов в условиях серийного производства.

В настоящей работе показана корреляция между ЛС и электрическими характеристиками выпускаемых промышленностью высоковольтных транзисторов, предложен способ улучшения их качества путем контролируемого расположения транзисторных структур на пластинах.

Транзисторные структуры серии ТК изготавливались по стандартной плаварно-эпитаксиальной технологии. В качестве исходных использовались кремниевые полированные пластины диаметром 60 мм и ориентацией в плоскости (111). Эпитаксиальный слой толщиной 55 мкм и

удельным сопротивлением 20 Ом·см выращивался методом восстановления хлоридов при температуре 1200 °С. Формирование базовых и эмиттерных областей транзисторов осуществлялись последовательной диффузией акцепторной (алюминий, бор) и донорной (фосфор) примесей при температурах выше 1000°С. На пластинках располагались семь транзисторных структур диаметром 17 мм: одна в центре, остальные — по краям пластины, диаметрально противоположно друг другу. Было изготовлено и исследовано свыше 700 структур.

Качество транзисторов оценивалось по значениям обратных токов и пробивных напряжений на основании изучения вольт-амперных характеристик (ВАХ) готовых приборов. Наличие дислокационных ЛС контролировалось методами оптической и рентгеновской дифракционной микроскопии. Степень дефектности транзисторных структур оценивалась коэффициентом заполнения ЛС по формуле

$$K_{\text{ЛС}} = 2,51h_{\text{max}}^2/r^2,$$

где h_{max} — максимальное радиальное удаление точки видимого пересечения двух ЛС от края пластины; r — радиус пластины.

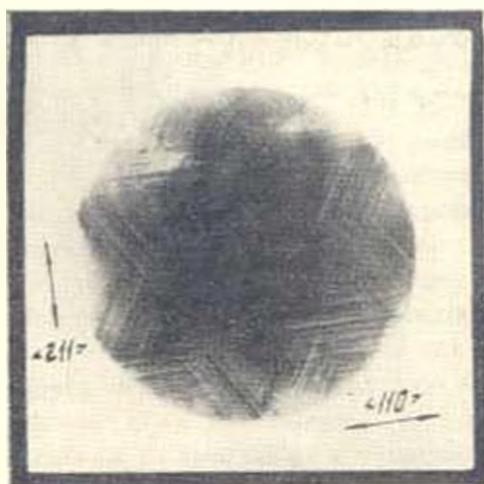


Рис. 1. Типичная картина распределения ЛС на пластине

На рис. 1 приведена типичная картина распределения ЛС на пластине, подвергнутой термической обработке. Видно, что под действием термоупругих напряжений ЛС распространяются от периферии вглубь пластины. Плоскости скольжения наклонены к поверхности под углом 70°32' (плоскости {111}) и пересекают поверхность по кристаллографическим направлениям типа $\langle 110 \rangle$, соответствующим наименьшим векторам трансляции в решетке монокристаллического кремния. Между указанными направлениями (по $\langle 211 \rangle$) формируются отдельные поля с единичными дислокациями или совершенно свободно от них. Проперационное наблюдение за ЛС показало, что их образование

начинается при эпитаксиальном выращивании ($K_c = 0,09-0,16$) и развивается на последующих термодиффузионных операциях ($K_{дс} = 0,35-0,6, 0,42-0,95, 0,42-1,1$ соответственно после диффузии алюминия, бора и фосфора). При этом, определяющими являются температура и скорость нагрева-охлаждения пластин. Источниками ЛС служат локальные механические повреждения по периферии пластины, образующиеся, главным образом, на операциях механической подготовки полированных пластин.

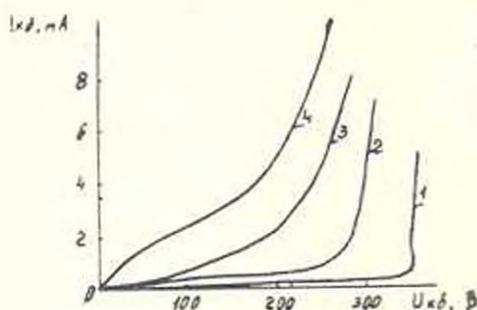


Рис. 2. Зависимость обратных ВАХ транзисторов от степени дефектности $K_{дс}$ (1 — 0, 2 — 0,43, 3 — 0,8, 4 — 1,1).

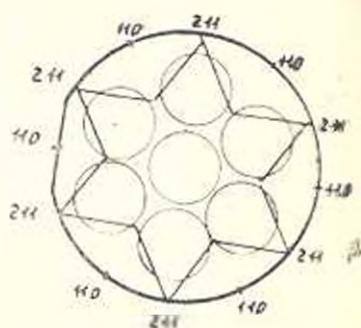


Рис. 3. Оптимальное кристаллогеометрическое распределение транзисторных структур на пластине.

Характерная серия ВАХ коллекторного перехода транзисторов с различными значениями $K_{дс}$ представлена на рис. 2. Хорошо видно, что наличие ЛС в активной области транзистора приводит к уменьшению значений пробивных напряжений и увеличению обратных токов. Наиболее высокие значения пробивных напряжений при фиксированных токах утечки имеют приборы с наименьшим числом повреждений ЛС. Именно этим объясняется тот факт, что практически всегда центральные приборы, для которых $K_{дс} \approx 0$, имеют лучшие электрические характеристики по сравнению с крайними приборами.

Был предложен способ повышения качества транзисторных структур путем их расположения в свободных от дислокаций зонах пластины. Для транзисторов серии ТК их оптимальное кристаллогеометрическое расположение на пластине показано на рис. 3. Отметим, что в серийном производстве контролируемое расположение транзисторных структур легко реализуется на операциях фотолитографии заданной фиксации фотошаблона относительно базового среза или ориентационных меток на торце пластины.

На рис. 4 приведено сопоставление гистограмм распределения пробивных напряжений коллекторного перехода транзисторов при оптимальном (сплошная линия) и произвольном (штриховая линия) расположении структур на пластинках. Видно, что наибольшая доля высоковольтных приборов, для которых $U_{кб} \geq 200 В$, получается при контролируемом расположении транзисторных структур. При этом процент выхода годных повышается на 20%.

Предложенный способ был опробован в заводских условиях в ЦПО «Транзистор» и дал положительный результат.

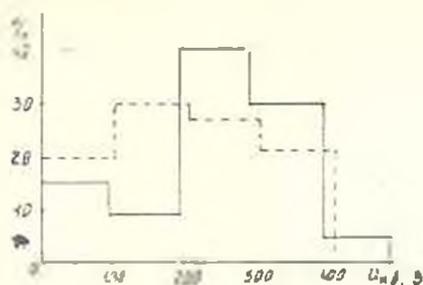


Рис. 1. Гистограммы распределения пробивных напряжений коллекторного перехода транзисторов при их оптимальном (сплошная линия) и произвольном (штриховая линия) расколении на пластинах.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Рейн К.* Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии: Пер. с англ. Под ред. С. Н. Гирина. — М.: Мир, 1984. — 475 с.
2. *Ковцевой Ю. А., Литвинов Ю. М., Фитсхов Э. А.* Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. — М.: Радио и связь, 1982. — 240 с.
3. *Fisher A. W.* Deformation-free cooling of silicon wafers. *Exp. Tech. Phys.* — 1981. V. 29, № 1. — P. 95 - 102.

Ր Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ի Ք Յ Ո Ի Ն

Վ. Հ. Խոսեկյան, Կ. Գ. Ավետիսյան: Մեխանիզմների զինամիկայական համադրումը բառայարժան անսափասարքապետության զորնակցի և շինքի վրա զինամիկ բեռնվածքների հափասարակչունան պայմանի	203
Գ. Լ. Պետրոսյան, Վ. Գ. Խանկյան, Գ. Վ. Կոտուկյան, Կ. Ն. Էղիբյան, Հ. Հ. Արմենյան: Հաստապատ սխառան զբաղմանը սահմանային մեղման հարցերը սահմանահաստիկությունների	206
Թ. Հ. Խանկյան, Յ. Խ. Վազարյան, Է. Ս. Սարգսյան: Միտակով կոտորվածքային նամակարգի բազմաուղի շինքի մասն և ուղղման ապաստանումների պարբերականների որոշումը	212
Ս. Ս. Կարապետյան: Էլեկտրական դաշար զեղանակով ներառումներով մրտցիտակրա նամակարգում արտաքին սխառնագրային դաշարի զեղանակ	216
Հ. Վ. Ավագյան, Ս. Հ. Վարդանյան, Գ. Հ. Կիրակոսյան, Ա. Ա. Նազարյան: Բազմաուղի ճան ուղեղագծանք ուղային սինցմարմինային արտագիտարային բանակներ	220
Թ. Ս. Վազարյան, Ս. Լ. Վազարյան: Աղարկական սպրանջների ընդունում և ներկանասարկերային կշռանակն արտաքին ինսցումներին նամակապատ արդյունավետություն	222
Վ. Ն. Ներսիսյան, Կ. Ս. Սարգսյան: Ճշմոռ սարքերի նամակարգում	229
Վ. Վ. Սողոմոնյան: Քվանտների բնարակն կերի վիճակագրական մոդելներ	233
Ս. Ս. Չատարյան, Լ. Վ. Խաչարյան, Ս. Է. Միկելյան: Փոփոխարտանակի խոսքման սկզբունքը սարտա բազմակայ ԱՅՀ նախաղմման ինզիդերնով	237
Վ. Վ. Հափեկյան: Պնակն անսափաստ բազմակայ սխառան կարգավորման նամակարգերի սխառնային սպրանջների կառուցման մեթոդիկա՝ շինված ներքի սղարգ կարգի խնդրին ընդուն սրտրկմի վրա	241
Է. Վ. Կազարյան, Գ. Գ. Տարզակ, Գ. Ս. Վազարյան: Մոդելային կարգող սխառնորտային նամակարգերի սխառնային զույգանիշների զնանստան վերաբերյալ	243
Ն. Գ. Նիկիտյան, Ն. Ս. Սարգսյան: Էլեկտրական մեղմանների բանակարգեր վրա սարգի ներարակման սղեղարային սխառնարման նամակարգ	249
Գ. Վ. Ավագյան, Վ. Գ. Խոսեկյան, Գ. Ս. Խաչարյան: Կոտորվածքային սխառնարի	
Գ. Ս. Արմենյան, Հ. Վ. Բախչեղյան, Գ. Ա. Խաչարյան: Կոտորվածքային սխառնների սղեղարային բարձրարդյուն սխառնարմանի որակի վրա	252

СОДЕРЖАНИЕ

В. Г. Трахман, Б. А. Тютюнян: Динамика сил сцепки между телами при коэффициенте трения, зависящем от движения и скорости сдвигов в контакте	203
Г. А. Петрусян, В. Г. Сапкян, Г. В. Мамедян, К. И. Аветисян, А. О. Аветисян: Особенности расчёта жесткости деталей фальшив по допускаемым напряжениям	206
Р. О. Сапкян, Ю. А. Сапкян, Г. С. Саркисян: К вопросу о динамическом поведении жестких и гибких крутящихся колющих многосвязных машин с моделью контактной системы	212
М. А. Киристян: Электроника в поле и в вакууме: первая глава о ферромагнитных явлениях при неоднородном внешнем поле	216
Р. В. Аветисян, А. А. Варданян, Г. Г. Кичикулян, А. С. Шахоян: Свойства твердотельные транзисторы в ключи с многосвязными элементами	220
Р. А. Казарян, А. А. Казарян: Сравнительная эффективность различных методов оптического метода измерения коэффициента сигнала	225
В. Н. Персесия, К. В. Ветверчин: Синтез корректирующих устройств	229
В. В. Багдадарян: Статистические модели селективного выхода кнопок	233
С. С. Захарьян, Э. В. Казарян, С. Е. Чилинян: Принцип управления в проблеме проектирования систем многосвязных САР	237
В. В. Овисян: Методика построения корпусных голографов ЛСМСАР, основанная на сведении проблемы к задаче Коши второго порядка	241
Э. В. Казарян, Г. Г. Колодян, Г. А. Казарян: К оценке показателей надежности транспортных средств на магнитном подвешивании	245
Н. Г. Никитян, Н. Г. Барсегян: Устройство для исследования влияния эксцентриситета на характеристики электрических машин	249
Г. Е. Айвазян, А. Г. Бабаджанян, Г. А. Мачарян: Влияние структурных дефектов на качество высоковольтных транзисторов	252