

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿՆԱԳԻՐ

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՐԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈՂԵԳԻԱ

Ռ.Ս. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ), Զ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. ԱԴԲԱԼՅԱՆ, Ռ.Վ. ԱԹՈՅԱՆ, Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ, Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Ս. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. МАРТИРОСЯН (главный редактор), А.А. ТЕРЗЯН (зам. глав. редактора),
З.К. СТЕПАНИЯН (ответственный секретарь), С.Г. АГБАЛЯН,
Р.В. АТОЯН, В.В. БУНИАТЯН, Ж.Д. ДАВИДЯН, С.П. ДАВТЯН, С.М. КАЗАРЯН,
В.З. МАРУХЯН, Ю.Л. САРКИСЯН, В.С. САРКИСЯН,
С.О. СИМОНЯН, М.Г. СТАКЯН, В.С. ХАЧАТРЯН

EDITORIAL BOARD

R.M. MARTIROSSYAN (Editor-in-Chief), H.A. TERZYAN (Vice-Editor-in-Chief),
Z.K. STEPANYAN (Secretary - in - Chief), S.G. AGHBALYAN,
R.V. ATOYAN, V.V. BUNIATYAN, Zh.D. DAVIDYAN, S.P. DAVTYAN,
S.M. GHAZARYAN, V.Z. MARUKHYAN, YU.L. SARGSYAN, V.S. SARKISSYAN,
S.H. SIMONYAN, M.G. STAKYAN, V.S. KHACHATRYAN

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՍՏԵՐԳԱՆՅԱՆ

Համակարգչային շարվածքը
և ձևավորումը՝

ԼԻԼԻԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ

Խմբագիրներ՝

ԼԵՅԼԱ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ
ՆԵԼԼԻ ԱՆԱՆՅԱՆ

© Издательство ГИУА

Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2010

С.Т. МЕЛКОНЯН, К.Г. СТЕПАНЯН, К.С. АРЗУМАНЯН,
Ю.Л. САРКИСЯН

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРАМИ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

На основе уравнений Лагранжа-Максвелла разработан метод решения задачи оптимального управления манипуляторами с последовательной и параллельной структурами, рассматриваемыми как электромеханические системы. Метод позволяет без введения дополнительных сил, изменением лишь напряжений в электроприводах, спланировать требуемые оптимальные движения механизмов, что существенно упрощает системы их управления.

Ключевые слова: манипулятор, оптимальное управление, уравнение Лагранжа-Максвелла, критерии качества.

Введение. При построении движений манипуляторов важное значение имеет определение таких законов изменения движущих сил в шарнирах или напряжений в электроприводах, которые бы обеспечивали заранее заданный закон движения выходного звена. Эта задача сводится к решению прямой задачи динамики манипуляторов, рассматриваемых как механические [1] или электромеханические системы [2,3]. Для многоподвижных манипуляторов она имеет бесчисленное множество решений, что позволяет осуществлять заданное движение выходного звена различными способами, отличающимися кинематическими и динамическими характеристиками. Во множестве этих движений важен выбор именно тех, при которых оптимизируются критерии качества, характеризующие желаемые кинематические и динамические свойства механизмов. Эти требования приводят к решению задач оптимального управления манипуляторами.

Анализ работ по оптимальному управлению роботами-манипуляторами [4-7] показывает, что при построении движений манипуляторов методы оптимального управления [8] не получили широкого применения, а известные приложения имеют частный характер [9,10]. Кроме того, известные до сих пор методы разработаны для манипуляторов с последовательной структурой и не могут быть применены к манипуляторам с параллельной структурой, особенно когда они рассматриваются как электромеханические системы. С целью устранения указанного пробела в настоящей работе в общем виде сформулирована задача оптимального управления многоподвижными манипуляторами произвольной структуры с учетом характеристик электроприводов и разработан упрощенный численный метод ее решения.

Предлагаемый в статье подход к динамическому управлению манипуляторами отличается простотой и эффективностью. При этом вместо принятого сложного процесса управления вращающимися моментами в активных парах манипулятора заданные законы движения выходных звеньев манипуляторов достигаются простым варьированием входных напряжений электроприводов, что позволяет значительно упростить систему управления [2].

1. Уравнения движений манипуляторов с электроприводами. Основным объектом исследования являются манипуляторы, оснащенные электроприводами. Важнейшим этапом оптимального проектирования и управления этими манипуляторами, представляемыми как электромеханические системы, является решение смешанной задачи их динамики. С этой целью составим дифференциальные уравнения, описывающие поведение этих систем, для манипуляторов с последовательной и параллельной структурами (рис.1,2).

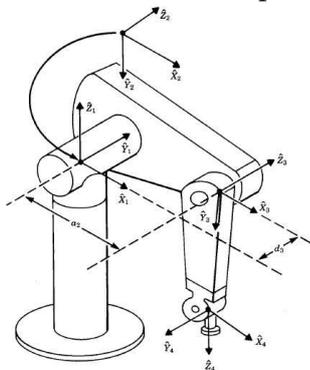


Рис.1. Манипулятор с последовательной структурой

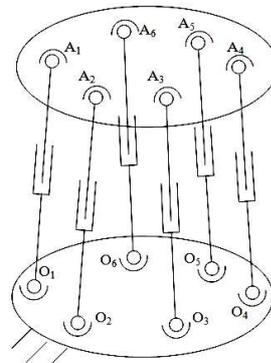


Рис.2. Манипулятор с параллельной структурой

Согласно известным уравнениям Лагранжа-Максвелла, уравнения движения манипуляторов с последовательной структурой приводятся к виду

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}(p, q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n b_{ij}(p, q) I_j + c_i(p, q, \dot{q}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n d_{ij}(p, q) \dot{I}_j + e_i(p, q, \dot{q}, I) = U_i - I_i R_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$, $\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n)$, $\ddot{q} = (\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_n)$ - вектор-функции обобщенных координат, скоростей и ускорений механической части; $I = (I_1, I_2, \dots, I_n)$ - вектор-функция сил тока, возникающих в роторе электродвигателя; $p = (p_1, p_2, \dots, p_v)$ - вектор постоянных параметров электромеханической системы; U_i ($i = 1, 2, \dots, n$) - напряжения в роторах; R_i - сопротивление в электрических цепях, а

$a_{ij}(p, q)$, $b_{ij}(p, q)$, $c_{ij}(p, q)$, $d_{ij}(p, q)$ и $e_{ij}(p, q, \dot{q}, I)$ - известные функции указанных параметров.

Из-за сложности уравнений, описывающих кинематические связи, традиционные методы образования уравнений движений не пригодны для параллельных манипуляторов. В настоящей работе разработан другой подход, который совмещает применение уравнений Лагранжа-Максвелла, принципа Ньютона-Эйлера и аксиом связей. В соответствии с предлагаемым подходом в параллельных манипуляторах уничтожается определенное число кинематических связей и согласно аксиомам связей прикладываются реакции этих связей. Для полученных подсистем составляются уравнения Лагранжа-Максвелла, которые дополняются уравнениями, восстанавливающими уничтоженные кинематические связи. В результате получаем систему смешанных дифференциальных и алгебраических уравнений:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}(p, q)\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n b_{ij}(p, q)\dot{I}_j + \sum_{j=1}^{m-n} c_{ij}(p, q)\bar{R}_j + d_i(p, q, \dot{q}) = 0, i = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n e_{ij}(p, q)\dot{I}_j + f_i(p, q, \dot{q}, I) = U_i - I_i R_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

$$F_i(p, q) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m - n, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m \frac{\partial F_i}{\partial q_j} \dot{q}_j = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m - n, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^m \frac{\partial F_i}{\partial q_j} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{\partial^2 F_i}{\partial q_j \partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m - n, \quad (7)$$

где $q = (q_1, q_2, \dots, q_n, q_{n+1}, \dots, q_m)$, $\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n, \dot{q}_{n+1}, \dots, \dot{q}_m)$, $\ddot{q} = (\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_n, \ddot{q}_{n+1}, \dots, \ddot{q}_m)$ - вектор-функции подгруппы обобщенных q_1, q_2, \dots, q_n , $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n$, $\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_n$ и "лишних" $q_{n+1}, q_{n+2}, \dots, q_m$, $\dot{q}_{n+1}, \dot{q}_{n+2}, \dots, \dot{q}_m$, $\ddot{q}_{n+1}, \ddot{q}_{n+2}, \dots, \ddot{q}_m$ координат, скоростей и ускорений; \bar{R}_j - реакции уничтоженных связей. Остальные обозначения приняты по аналогии с предыдущим случаем.

2. Динамическое исследование манипуляторов с электроприводами. На основе уравнений (1)-(7) авторами ранее был разработан универсальный метод решения прямой и обратной задач динамики манипуляторов, рассматриваемых как электромеханические системы, для дальнейшего использования в процессе оптимального проектирования и управления этими системами.

Однако анализ показывает, что при построении оптимальных движений манипуляционных механизмов без введения дополнительных сил приходится решать

смешанную задачу динамики, постановка и алгоритм реализации которой приводятся ниже.

Допустим, заданы вектор постоянных параметров электромеханической системы $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_v)$, а также законы изменения

$$q_j = q_j(t), \quad \dot{q}_j = \dot{q}_j(t), \quad \ddot{q}_j = \ddot{q}_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

обобщенных координат, скоростей и ускорений ее механической части. Требуется определить законы изменения напряжений $U_i = U_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) в электрических цепях в зависимости от времени так, чтобы они обеспечили заданные законы изменения (8) обобщенных координат системы.

Ввиду сложности уравнений (5) кинематических связей аналитическое решение поставленной задачи для механизмов с параллельной структурой (рис. 2) не представляется возможным. Поэтому она решается численным методом, реализуемым по следующему алгоритму.

1. В период времени $[t_0, t_k]$ движения электромеханической системы вводим равномерно распределенную сетку $t_0, t_1, t_2, \dots, t_N = t_k$, $t_r = t_0 + r \cdot \Delta t$, $\Delta t = (t_k - t_0) / N$ ($r = 0, 1, 2, \dots, N$).

2. Для момента времени $t = t_r$ ($r = 0, 1, 2, \dots, N$) определяем значения

$$q_j^r = q_j(t_r), \quad \dot{q}_j^r = \dot{q}_j(t_r), \quad \ddot{q}_j^r = \ddot{q}_j(t_r), \quad j = 1, 2, \dots, n$$

обобщенных координат, скоростей и ускорений механической части.

3. Подставив значения $q_j = q_j^r$ ($j = 1, 2, \dots, n$) обобщенных координат механической части в систему уравнений (5) и решив ее относительно "лишних" координат q_j ($j = n + 1, n + 2, \dots, m$), получим их значения $q_j^r = q_j(t_r)$ ($j = n + 1, n + 2, \dots, m$) в момент времени $t = t_r$.

4. Подставив значения $q_j = q_j^r$ ($j = 1, 2, \dots, m$), $\dot{q}_j = \dot{q}_j^r$ ($j = 1, 2, \dots, n$) обобщенных и "лишних" координат и скоростей в систему уравнений (6) и решив ее относительно "лишних" скоростей \dot{q}_j ($j = n + 1, n + 2, \dots, m$), получим их значения $\dot{q}_j^r = \dot{q}_j(t_r)$ ($j = n + 1, n + 2, \dots, m$) в момент времени $t = t_r$.

5. Подставив значения $q_j = q_j^r$, $\dot{q}_j = \dot{q}_j^r$ ($j = 1, 2, \dots, m$), $\ddot{q}_j = \ddot{q}_j^r$ ($j = 1, 2, \dots, n$) обобщенных и "лишних" координат, скоростей и ускорений в систему уравнений (7) и решив ее относительно "лишних" ускорений \ddot{q}_j ($j = n + 1, n + 2, \dots, m$), получим их значения $\ddot{q}_j^r = \ddot{q}_j(t_r)$ ($j = n + 1, n + 2, \dots, m$) в момент времени $t = t_r$.

6. Подставив значения $q_j = q_j^r$, $\dot{q}_j = \dot{q}_j^r$, $\ddot{q}_j = \ddot{q}_j^r$ ($j = 1, 2, \dots, n$) обобщенных и "лишних" координат, скоростей и ускорений механической части в систему

уравнений (3) и решив ее относительно сил реакции \bar{R}_j ($j=1,2,\dots,m-n$) и сил тока I_j ($j=1,2,\dots,n$), получим их значения $\bar{R}_j^r = \bar{R}_j(t_r)$ ($j=1,2,\dots,m-n$) и $I_j^r = I_j(t_r)$ ($j=1,2,\dots,n$) в момент времени $t = t_r$.

7. Осуществляя пункты 1-6 данного алгоритма для случаев $r=0,1,2,\dots,N-1$, получим искомые значения указанных параметров в узловых точках построенной выше сетки.

8. Принимая постоянными обобщенные ускорения \dot{I}_j электрической части в период времени $[t_r, t_{r+1}]$ ($r=0,1,2,\dots,N-1$), определяем их значения в моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$ с помощью выражений

$$\dot{I}_j^r = \frac{I_j^{r+1} - I_j^r}{\Delta t}, \quad j=1,2,\dots,n, \quad r=0,1,2,\dots,N-1.$$

9. Подставив для каждого момента времени t_r ($r=0,1,2,\dots,N-1$) значения обобщенных координат, скоростей и ускорений $q_j = q_j^r$, $\dot{q}_j = \dot{q}_j^r$, $I_j = I_j^r$, $\dot{I}_j = \dot{I}_j^r$ ($j=1,2,\dots,n$) в систему уравнений (4) и решив ее относительно напряжений U_i , получим их значения $U_i^r = U_i(t_r)$ ($i=1,2,\dots,n$, $r=0,1,2,\dots,N-1$) в момент времени $t=t_r$. Нетрудно убедиться, что для механизмов с последовательной структурой (рис. 1) поставленная выше задача решается аналогично. Поскольку эти механизмы не имеют “лишних” координат, скоростей и ускорений, то решение этой задачи сводится к выполнению пунктов 1,2 и 6-9 предыдущего алгоритма, причем при выполнении пункта 6 для определения значений I_j ($j=1,2,\dots,n$) сил тока и напряжений U_i ($i=1,2,\dots,n$) необходимо решить систему уравнений (1) и (2).

3. Постановка задачи оптимального управления манипуляторами. Наличие большого числа степеней свободы в манипуляторах позволяет осуществлять движения их исполнительных механизмов различными способами, что, в свою очередь, позволяет учитывать ряд дополнительных условий при построении движений. В частности, из множества законов движения возможно выбрать такие, которые минимизируют заданные критерии качества, характеризующие эффективность функционирования механизма. Такие требования приводят к задачам оптимального управления, которые в данном случае можно сформулировать следующим образом.

Допустим, поведение электромеханической системы описывается системами уравнений (1)-(2) или (3)-(7). Обозначим вектор-функции обобщенных координат и ускорений механической части соответственно через $q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))$ и $\dot{q}(t) = (\dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), \dots, \dot{q}_n(t))$, вектор-функцию обобщенных координат электрической части - $I(t) = (I_1(t), I_2(t), \dots, I_k(t))$, а вектор-функцию напряжений электрической

части $-U(t) = (U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t))$. В дальнейшем пару $(q(t), \dot{q}(t))$ назовем фазовыми координатами, а $U(t)$ - функцией управления или просто управлением.

Допустим, задан также критерий качества

$$\Psi_0(q, \dot{q}, I, U) = \int_{t_0}^{t_k} f_0(q, \dot{q}, I, U) dt, \quad (9)$$

оценивающий работу электромеханической системы, а также его начальное

$$C_0 = (q_1(t_0), \dots, q_n(t_0), \dot{q}_1(t_0), \dots, \dot{q}_n(t_0)) \quad (10)$$

и конечное

$$C_k = (q_1(t_k), \dots, q_n(t_k), \dot{q}_1(t_k), \dots, \dot{q}_n(t_k)) \quad (11)$$

состояния в моменты времени $t=t_0$, где функция $f_0(q, \dot{q}, I, U)$ определена постановкой задачи.

Требуется из всех возможных функций управления определить такую функцию $U(t) = (U_1(t), \dots, U_n(t))$, которая, переводя систему из начального состояния (10) в конечное (11), минимизирует критерий качества (9) при следующих ограничениях:

$$f_{1j}(t) \leq q_j(t) \leq f_{2j}(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

$$f_{3j}(t) \leq \dot{q}_j(t) \leq f_{4j}(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$f_{5j}(t) \leq I_j(t) \leq f_{6j}(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

$$f_{7i}(t) \leq U_i(t) \leq f_{8i}(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где $f_{1j}(t), f_{2j}(t), \dots, f_{8j}(t)$ – известные функции.

4. Численный метод решения задачи оптимального управления. Для решения рассматриваемой задачи можно применить известные численные методы оптимального управления [11]. Однако в данном случае это приведет к затруднениям вычислительного характера. Ниже приводится упрощенный итерационный метод решения указанной задачи, который основан на равенстве числа обобщенных координат рассматриваемой электромеханической системы числу функций управления и учитывает ограничения (12) и (13) на их области изменения. На каждом шагу (q, \dot{q}) фазового пространства происходит переход от одной текущей опорной траектории (рис.3) к другой с уменьшением значения минимизируемого критерия качества (9).

Для решения задачи предлагаемым методом в период времени $[t_0, t_k]$ движения манипулятора вводится равномерно распределенная сетка

$t_0, t_1, t_2, \dots, t_N = t_k$, $t_r = t_0 + r \cdot \Delta t$, $\Delta t = (t_k - t_0) / N$ ($r = 0, 1, 2, \dots, N-1$). Далее по узловым точкам сетки дискретизируются критерий качества (9) и ограничения (12) и (13), в результате чего они получают следующие выражения:

$$\Psi_0 = \sum_{r=0}^{N-1} f_0(q^r, \dot{q}^r, I^r, U^r) \Delta t \quad , \quad (14)$$

$$f_{1j}(t_r) \leq q_j(t_r) \leq f_{2j}(t_r), \quad t_r \in [t_0, t_k], \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (15)$$

$$f_{3j}(t_r) \leq \dot{q}_j(t_r) \leq f_{4j}(t_r), \quad t_r \in [t_0, t_k], \quad j=1, 2, \dots, n,$$

$$f_{5j}(t_r) \leq I_j(t_r) \leq f_{6j}(t_r), \quad t_r \in [t_0, t_k], \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (16)$$

$$f_{7i}(t_r) \leq U_i(t_r) \leq f_{8i}(t_r), \quad t_r \in [t_0, t_k], \quad j=1, 2, \dots, n.$$

Дискретизируется также выбранная опорная траектория, что приводит к дискретному множеству точек $C_0(C_{t_0}), C_1, \dots, C_N(C_{t_k})$ (рис. 3) в данном пространстве, для которых вычисляется значение Ψ_0 критерия качества (14).

После дискретизации задачи переход от выбранной опорной траектории к новой траектории в фазовом пространстве (рис. 3), при сохранении точек C_0 и C_N , сводится к определению нового множества точек C_1, C_2, \dots, C_{N-1} , для которых критерий качества (14) принимает значение, меньшее Ψ_0 для предыдущего множества точек.

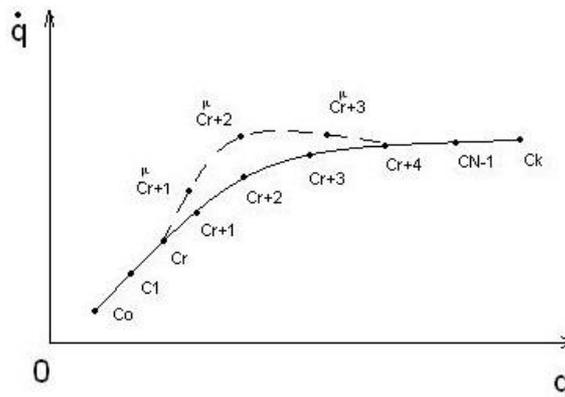


Рис.3. Изменение опорной траектории

Ниже приводится алгоритм решения рассматриваемой задачи, в каждой фазе которого замена множества точек C_r ($r = 0, 1, 2, \dots, N-1$) новыми точками осуществляется чередованием подфаз. Для каждой подфазы из всех C_r ($r = 0, 1, 2, \dots, N-1$) точек производится замена некоторым числом чередующихся точек. В данном случае число заменяемых точек равно трем, что вытекает из равенства чисел обобщенных координат и функций управления, а также непрерывности изменения фазовых координат. r -я подфаза одной фазы алгоритма осуществляется в следующей последовательности.

1. В окрестностях точек $C_{r+2}(q^{r+2}, \dot{q}^{r+2})$ фазового пространства (q, \dot{q}) строим гиперкуб со стороной $2a$, где составляющие векторов $q^{r+2} = (q_1^{r+2}, q_2^{r+2}, \dots, q_n^{r+2})$, $\dot{q}^{r+2} = (\dot{q}_1^{r+2}, \dot{q}_2^{r+2}, \dots, \dot{q}_n^{r+2})$ представляют собой значения обобщенных координат и скоростей механической части в момент времени $t = t_{r+2}$, которые являются известными величинами, определяемыми по опорной траектории.

2. Гиперкуб, построенный в окрестности точки $C_{r+2}(q^{r+2}, \dot{q}^{r+2})$, покрываем сеткой требуемой плотности. Текущую узловую точку этой сетки обозначим через $C_{r+2}^\mu (q^{(r+2)\mu}, \dot{q}^{(r+2)\mu})$ ($\mu = 1, 2, \dots, N_1$).

3. Выбираем текущую узловую точку $C_{r+2}^\mu (q^{(r+2)\mu}, \dot{q}^{(r+2)\mu})$ и с помощью выражений

$$\begin{aligned} q_j^{(r+k)\mu} &= 0,25(\dot{q}_j^{(r+k-1)\mu} - \dot{q}_j^{(r+k+1)\mu})\Delta t + 0,5(q_j^{(r+k+1)\mu} + q_j^{(r+k-1)\mu}), \quad k = 1, 3, \\ \dot{q}_j^{(r+k)\mu} &= -0,5(\dot{q}_j^{(r+k-1)\mu} - \dot{q}_j^{(r+k+1)\mu})\Delta t + (q_j^{(r+k+1)\mu} + q_j^{(r+k-1)\mu})\Delta t^{-1}, \quad k = 1, 3, \\ \ddot{q}_j^{(r+k)\mu} &= (\dot{q}_j^{(r+k+1)\mu} - \dot{q}_j^{(r+k)\mu})\Delta t^{-1}, \quad k = 0, 1, 2, 3, \\ q_j^{\mu} &= q_j^r, \dot{q}_j^{\mu} = \dot{q}_j^r, q_j^{(r+4)\mu} = q_j^{r+4}, \dot{q}_j^{(r+4)\mu} = \dot{q}_j^{r+4}, \\ & \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (17)$$

определяем значения обобщенных координат, скоростей и ускорений механической части для моментов времени t_r, t_{r+1}, t_{r+2} , которые определяются из условий непрерывности изменения обобщенных координат и скоростей, а также постоянства обобщенных ускорений в периодах времени $[t_r, t_{r+1}], [t_{r+1}, t_{r+2}], [t_{r+2}, t_{r+3}], [t_{r+3}, t_{r+4}]$.

4. Для полученных значений (17) обобщенных координат и скоростей проверяем ограничения (15) и из индексов μ выбираем те, для которых имеют место указанные ограничения. Если такие индексы существуют, то переходим к пункту 5 алгоритма. В противном случае, принимаем $r = r+1$ и возвращаемся к пункту 1 алгоритма.

5. Для моментов времени $t_r, t_{r+1}, t_{r+2}, t_{r+3}$, пользуясь полученными из выражения (17) значениями обобщенных координат, скоростей и ускорений, решаем смешанную задачу динамики системы и определяем значения функции управления и сил тока $U_i^\mu, U_i^{(r+1)\mu}, U_i^{(r+2)\mu}, U_i^{(r+3)\mu}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), $I_j^\mu, I_j^{(r+1)\mu}, I_j^{(r+2)\mu}, I_j^{(r+3)\mu}$ ($j = 1, 2, \dots, n$), ($\mu \in [1, N_1]$) для моментов времени $t_r, t_{r+1}, t_{r+2}, t_{r+3}$.

6. Для полученных значений функций управления и сил тока проверяем ограничения (16) и из индексов μ выбираем те, которые удовлетворяют указанным ограничениям. Если такие номера существуют, то переходим к пункту 7 алгоритма, в противном случае, принимаем $r = r + 1$ и возвращаемся к пункту 1 алгоритма.

7. Подставив значения обобщенных координат, скоростей и функций управления в выражение критерия качества (14), определяем его значение Ψ_0^μ . При определении значения выражения Ψ_0^μ в сумме (14) меняются только те значения функции f_0 , которые соответствуют моментам времени $t_r, t_{r+1}, t_{r+2}, t_{r+3}$.

8. Для полученных индексов μ определяем тот индекс μ^* , для которого имеет место следующее условие:

$$\Psi_0^{\mu^*} = \min_{\{\mu\}} \Psi_0^\mu.$$

9. Проверяем условие $\Psi_0^{\mu^*} \leq \Psi_0$. Если оно удовлетворяется, то во множестве точек C_0, C_1, \dots, C_N опорной траектории точки $C_{r+1}, C_{r+2}, C_{r+3}$ заменяем точками $C_{r+1}^{\mu^*}(q^{(r+1)\mu^*}, \dot{q}^{(r+1)\mu^*})$, $C_{r+2}^{\mu^*}(q^{(r+2)\mu^*}, \dot{q}^{(r+2)\mu^*})$, $C_{r+3}^{\mu^*}(q^{(r+3)\mu^*}, \dot{q}^{(r+3)\mu^*})$, принимаем $r = r + 1$ и возвращаемся к пункту 1 алгоритма.

Построение новой траектории в фазовом пространстве завершается, когда $r = N - 4$.

Если условие $\Psi_0^{\mu^*} \leq \Psi_0$ и ограничения (15) и (16) не удовлетворяются для всех $r \in [0, N]$, то уменьшаем в два раза размеры гиперкуба, построенного в пункте 1, и повторяем данный алгоритм.

Решение задачи заканчивается, когда размеры гиперкуба, построенного в пункте 1, удовлетворяют условию $2a \leq \varepsilon$, где ε - заданная точность вычислений. Вычисленные значения фазовых координат и управлений представляют собой решение поставленной задачи.

Заключение. На основании общей математической теории оптимальных процессов сформулирована и решена задача оптимального управления манипуляторами с параллельной и последовательной топологиями, рассмотренными как электромеханические системы. Разработан численный метод решения поставленной задачи с возможностью определения таких управляющих функций манипуляторов, которые бы позволяли при построении движений оптимизировать желаемые критерии качества. Предлагаемый в работе подход позволяет изменением

лишь напряжений в электроприводах и без введения дополнительных сил построить оптимальные движения манипуляторов, что существенно упрощает системы их управления. Ввиду ограниченного объема статьи результаты и примеры численной реализации представленного метода здесь не приведены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л.** Манипуляционные роботы, динамика и алгоритмы.-М.: Наука, 1978.- 398 с.
2. **Fateh M. M.** On the Voltage-Based Control of Robot Manipulators// International Journal of Control, Automation, and Systems.- October, 2008. - V. 6, №5.-P.702-712.
3. **Izadbakhsh A., Fateh M. M., Sadrnia M. A.** Discontinuous Feedback Linearization of an Electrically Driven Fast Robot Manipulator/ World Academy of Science// Engineering and Technology.-2007.-29.-P.217-222.
4. **Konolige K.** A Gradient Method for Realtime Robot Control// Intelligent Robots and Systems.-2000 (IROS 2000).- V.1. - P.639 – 646.
5. **Simmons G., Demiris Y.** Optimal Robot Arm Control Using The Minimum Variance Model// Journal of Robotic Systems. – November, 2005.
6. **Veeraklaew T., Malisuwan S.** The Direct Approach of General Dynamic Optimal Control: Application on General Software// International Journal of The Computer, the Internet and Management. – May-August, 2006.-V.14, №2.-P.82-87.
7. **Hast M., Ekesson J., Robertsson A.** Optimal Robot Control Using Modelica and Optimica// Proceedings 7th Modelica Conference. - Como, Italy, Sep. 20-22, 2009.
8. **Понтрягин Л.С.** Математическая теория оптимальных процессов.-М.: Наука, 1976. - 392 с.
9. **Schiller Z.** Time-energy optimal control of articulated systems with geometric path constraints// Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Trans. ASME. – 1996.-V. 118.-P.135-143.
10. **Саркисян Ю.Л., Степанян К.Г., Оганджян А.Ж.** Численный метод оптимального управления механизмов искусственных органов// Проблемы прикладной механики.- Тбилиси, 2002.- №4 (9).- С.9-13.
11. **Федоренко Р.П.** Приближенное решение задач оптимального управления.-М.: Наука, 1978.-488с.

ГИУА (П). Материал поступил в редакцию 15.04.2010.

Մ.Տ. ՄԵԼԿՈՆՅԱՆ, Կ.Գ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, Կ.Ս. ԱՐԶՈՒՄԱՆՅԱՆ,
ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՏՈՐՆԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄՆ ԷԼԵԿՏՐԱՇԱՐԺԱԲԵՐՆԵՐԻ
ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՍԲ

Լազրանժ-Մաքսվելի հավասարումների հիման վրա մշակվել է որպես էլեկտրամեխանիկական համակարգեր դիտարկվող հաջորդական և զուգահեռ կառուցվածքներով մանիպուլյատորների օպտիմալ կառավարման խնդրի լուծման պարզեցված մեթոդ: Այն թույլ է տալիս միայն էլեկտրաշարժաբեռներում մուտքի լարումների փոփոխման միջոցով կառուցել մեխանիզմների պահանջվող օպտիմալ շարժումները, ինչն էապես պարզեցնում է դրանց կառավարման համակարգերը:

Առանցքային բառեր. մանիպուլյատոր, օպտիմալ կառավարում, Լազրանժ-Մաքսվելի հավասարում, որակի չափանիշներ:

S.T. MELKONYAN, K.G. STEPANYAN, K.S. ARZUMANYAN,
Yu.L. SARKISSYAN

OPTIMAL CONTROL OF MANIPULATORS TAKING INTO ACCOUNT
CHARACTERISTICS OF ELECTRIC DRIVES

A method of an optimum control problem solving of electrically actuated manipulators with serial and parallel structures based on the Lagrange-Maxwell equations is developed. The method allows to construct required optimal movements of mechanisms by changing only input voltages in electric drives that essentially simplifies their control systems.

Keywords: manipulator, optimal control, Lagrange-Maxwell equations, quality criteria.

Է.Ա. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ

ԼԻՍԵՆՆԵՐԻ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄՆԵՐԻ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ ՄԻԱԳՈՐԾՈՆ ՑՐՎԱԾՔԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄԸ ԵՎ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԱՊԱՀՈՎՈՒՄԸ

Քննարկվում են լիսենսների հոգնածային դիմադրության հաշվարկների կատարելագործման խնդիրները՝ ազդող գործոնների հավանական բնույթի հաշվառմամբ: Դիտարկվում է քվանտիլային հոգնածային գծերի ընտանիքների հավասարումների ճշգրտման հարցը՝ գերլարումների մակարդակներով լիսենսների ցիկլային երկարակեցությունների ցրվածքային փոփոխականության հաշվառմամբ: Հավանականային հաշվարկների կատարման համար ստեղծված է համակարգչային ծրագիր երկարակեցությունների փոփոխականային շարքերի միագործոն ցրվածքային վերլուծության կիրառմամբ:

Առանցքային բառեր. ցիկլային երկարակեցություն, հոգնածային դիմադրություն, միագործոն ցրվածքային վերլուծություն, քվանտիլային հոգնածային գծերի ընտանիք:

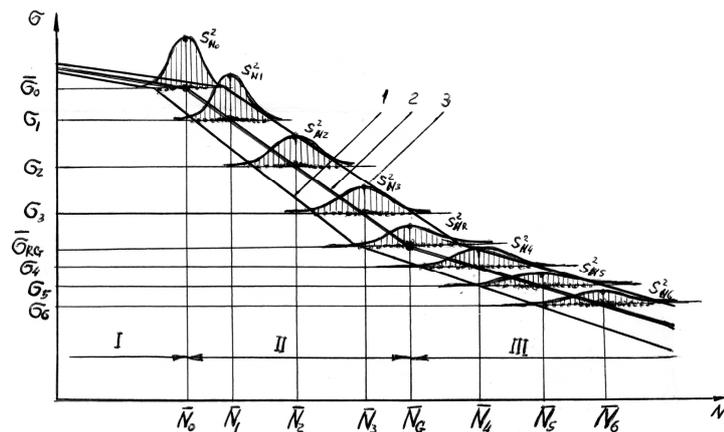
Ծանրաբեռնված մեքենամասերի և հանգույցների հոգնածային դիմադրությունը զգալիորեն պայմանավորում է պարբերական բեռնվածության ազդեցությանը ենթարկվող մեքենաների կառուցվածքների ամրությունը, երկարակեցությունը և հուսալիությունը: Նվազագույն զանգվածի ապահովումը բարձր արտադրողականություն և աշխատանքային արագություններ պահանջող ժամանակակից մեքենաների և տեխնոլոգիական սարքավորման ստեղծման գործընթացում պահանջում է լիովին օգտագործել նրանց կրողունակության գոյապաշարը, որն իր հերթին զգալիորեն բարձրացնում է մեքենամասերի վտանգավոր հատվածների լարվածությունը: Այս առումով հատկանշական է մեքենաներում և տեխնոլոգիական սարքավորումներում լայնորեն օգտագործվող տարբեր նշանակության և կառուցվածքի լիսենսների հոգնածային դիմադրության ուսումնասիրման խնդիրը, քանի որ դրանք կազմում են հոգնածային քայքայման պատճառով մեքենաների մերժերի զգալի մասը:

Լիսենսների ճշգրտված հաշվարկները նախատեսում են հավանականությունների տեսության և մաթեմատիկական վիճակագրական դրույթների լայն կիրառում: Մինչ այժմ ստեղծված են հաշվարկային մեթոդներ և առաջադրված մաթեմատիկական մոդելներ, որոնք ֆորմալիզացնում են հոգնածային քայքայման գործընթացը երկարակեցությունների տարբեր գոտիներում: Այդ գոտիներից առավել հետաքրքրություն է ներկայացնում բազմացիկլային հոգնածային քայքայման գոտին, որը համապատասխանում է տարբեր նշանակության մեքենաների լայն դասի ծառայության ժամկետներին (նկ. 1):

II և III գոտիների համար առաջարկված է քվանտիլային հոգնածային գծերի ընտանիքի հավասարում, որի պարամետրը նորմալ բաշխման z_p քվանտիլն է [1].

$$\lg N = \overline{(\lg N + z_p s_{N_r})} - \overline{(m + z_p s_m)} (\lg \sigma - \overline{\lg \sigma}), \quad (1)$$

որտեղ N ցիկլային երկարակեցությունների s_N^2 ցրվածքների փոփոխականությունը առաջին մոտարկմամբ հաշվի է առնվում N -ի բաշխման կենտրոնում ցրվածքի s_{N_r} անհատական չափով և հոգնաձային գծի m թեքության ցուցչի s_m միջին քառակուսային շեղման գործակցով, այսինքն՝ (1) - ում N երկարակեցությունների s_i^2 ցրվածքների փոփոխություններն ըստ σ_i գերլարումների մակարդակների ընդունվում են գծային օրենքով և ընդ որում՝ $s_{N_1}^2 \leq s_{N_2}^2 \leq \dots \leq s_{N_i}^2 \leq \dots \leq s_{N_k}^2, i = \overline{1, k}$ (k -ն σ_i գերլարումների մակարդակների թիվն է):



Նկ. 1. Լիսեռների քվանտիլային հոգնաձային գծերի ընտանիքների սխեմատիկ դասավորվածությունը սակավացիկլային (I), բազմացիկլային (II) և երկարատև (III) հոգնաձային քայքայման գոտիներում. 1, 2, 3 - քայքայման հավանականությունների $P(N_1) < P(N_2) < P(N_3)$ մակարդակների համապատասխանող քվանտիլային հոգնաձային գծերը

Ընդհանուր դեպքում նման մոտեցումը համապատասխանում է իրականությանը, բայց յուրաքանչյուր գործոնի ազդեցությունը (մասշտաբային երևույթ, բեռնվածքի փոփոխման օրենք, նյութի միկրոկառուցվածք, աշխատանքային մակերևույթների ֆիզիկամեխանիկական վիճակ, ջերմամշակման տեսակ, միջավայրի ազդեցություն և այլն) ցիկլային երկարակեցությունների $s_{N_i}^2$ ցրվածքների վրա տարբեր ձևով է արտահայտվում՝ $s_{N_i}^2 \approx const$ -ից մինչև $s_{N_i}^2 = f(\sigma_i)$, ընդ որում այդ ֆունկցիոնալ կապը կարող է տարբեր բնույթ կրել: Նման դեպքում առաջին քայլն՝ ըստ σ_i գերլարումների մակարդակների՝ N_i երկարակեցությունների փոփոխական շարքերի $s_{N_i}^2$ ցրվածքների համասեռության ստուգումն է միագործոն ցրվածքային վերլուծության մեթոդով, որի հաշվարկային ընթացակարգը հանգամանորեն մշակված է [2,3]: Մասնավորապես, այդ մեթոդը ՀՊՃՀ(Պ) մեքենագիտության ամբիոնում կիրառված է կենսաբժշկական տվյալների վիճակագրական մշակման գործընթացում [4]:

Լիսեռների և փորձանմուշների հոգնաձային փորձարկումների հիման վրա, ըստ σ_i գերլարումների մակարդակների, կազմում են ցիկլային երկարակեցությունների լոգարիթմների $\lg N_i$ փոփոխական շարքերը՝

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n, \quad i = \overline{1, n}, \quad x_i = \lg N_i,$$

և հաշվարկում գումարները՝ $\sum_{i=1}^n x_i, \sum_{i=1}^n x_i^2, \sum_{i=1}^n x_i^3, \sum_{i=1}^n x_i^4,$

սկզբնական և կենտրոնական մոմենտները՝ $h_1 = \bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i/n, h_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2/n,$

$$h_3 = \sum_{i=1}^n x_i^3/n, h_4 = \sum_{i=1}^n x_i^4/n, M_3 = h_3 - 3h_2h_1 + 2h_1^3, M_4 = h_4 - 4h_3h_1 + 6h_2h_1^2 - 3h_1^4,$$

ցրվածքը և միջին քառակուսային շեղումը՝ $D = s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right], s = \sqrt{D} :$

Որոշում են ընտրանքային անհամաչափության և էքսցեսի ցուցանիշները՝ $s_k = M_3/s^3,$
 $E_k = (M_4/s^4) - 3$ և փոփոխական գործակիցները՝ $v_x = (s/\bar{x}) \cdot 100\%, v_{s_k} = (s_{s_k}/|s_k|) \cdot 100\%,$
 $v_{E_k} = (s_{E_k}/|E_k|) \cdot 100\%, s_{s_k} = \sqrt{6(n-1)/(n+1)(n+3)}, s_{E_k} = \sqrt{24(n-2)(n-3)n/(n-1)^2(n+3)(n+5)} :$

Հաշվարկների արդյունքների հիման վրա կազմում են վիճակագրական աղյուսակ:
 Փոփոխական շարքերի համասեռությունն ստուգում են ըստ [1]-ի.

$$\chi^2 = \frac{2,3026}{c} \left[\left(\sum_{i=1}^m n_i - m \right) \lg s^2 - \sum_{i=1}^m (n_i - 1) \lg s_i^2 \right] \leq \chi_\alpha^2 :$$

Եթե $\chi^2 \leq \chi_\alpha^2$, ապա հաշվարկները շարունակում են, իսկ $\chi^2 > \chi_\alpha^2$ դեպքում փոխում են $\alpha = 0,10$ արժեքը և կրկին $\chi^2 > \chi_\alpha^2$ -ի դեպքում հաշվարկները դադարեցվում են:

Հաշվարկում են ընտրանքային ընդհանուր միջինը՝ $\bar{x} = \sum_{i=1}^m n_i \bar{x}_i / \sum_{i=1}^m n_i,$

միջշարքային (արտաքին) s_i^2 և ներշարքային (մնացորդային) s_{ii}^2 ցրվածքները՝
 $s_i^2 = \left[\sum_{j=1}^m n_j \bar{x}_i^2 - \left(\sum_{j=1}^m n_j \bar{x}_i \right)^2 / \sum_{j=1}^m n_j \right] / (m-1), s_{ii}^2 = \left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_i} x_{ij}^2 - \sum_{j=1}^m \left(\sum_{k=1}^{n_i} x_{ij} \right)^2 / n_i \right] / \left(\sum_{i=1}^m n_i - m \right) :$

Այստեղ և հետագայում m -ը խմբում հետազոտվող փոփոխական շարքերի քանակն է, $i = \overline{1, m}, n_i$ -ն՝ i -րդ փոփոխական շարքի անդամների քանակը, $j = \overline{1, n_i} :$

Փոփոխական շարքերի համասեռությունն ստուգում են ըստ Ֆիշերի չափանշի՝
 $F = s_1^2/s_2^2 < F_{1-\alpha},$ որտեղ $F_{1-\alpha}$ -ն Ֆիշերի չափանշի արժեքն է $\alpha = 0,05, k_1 = (m-1),$
 $k_2 = \left(\sum_{i=1}^m n_i - m \right) :$

Եթե $F \leq F_{1-\alpha}$, ապա որոշում են ընտրանքային ընդհանուր ցրվածքը՝

$$s_0^2 = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} \right)^2 / \sum_{i=1}^m n_i \right] / \left(\sum_{i=1}^m n_i - 1 \right),$$

ինչպես նաև գլխավոր միջինի և գլխավոր ցրվածքի վստահական միջակայքերը [1].

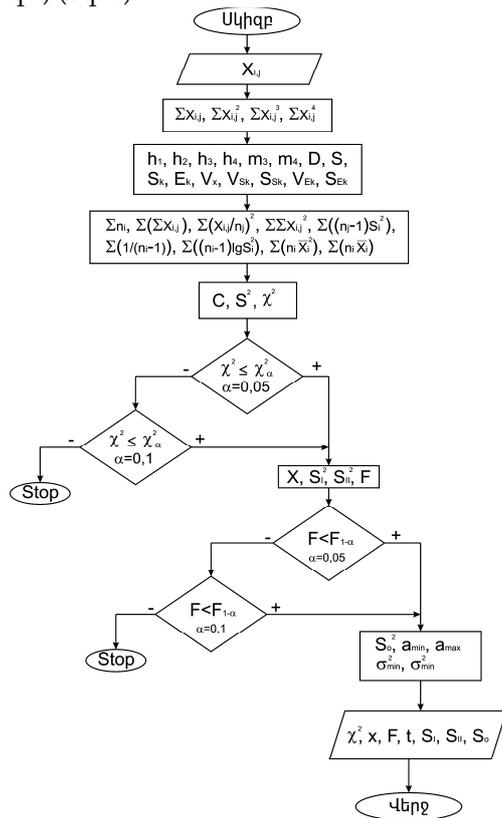
$$\bar{x} - s_0 t_{\alpha, k} / \sqrt{\sum_{i=1}^m n_i} < a < \bar{x} + s_0 t_{\alpha, k} / \sqrt{\sum_{i=1}^m n_i}, s_0^2 \left(\sum_{i=1}^m n_i - 1 \right) / \chi_{P_1}^2 < \sigma^2 < s_0^2 \left(\sum_{i=1}^m n_i - 1 \right) / \chi_{P_2}^2 :$$

Եթե $F > F_{1-\alpha}$, ապա փոխում են $\alpha = 0,10$, իսկ $F > F_{1-\alpha}$ կրկնվելու դեպքում այդ շարքը որոնվում է՝ զույգ առ զույգ ստուգելով շարքերն ըստ Ստյուդենտի չափանշի [1].

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \leq t_{\alpha, k},$$

որտեղ x_1, x_2, n_1, n_2 -ը և s_1^2, s_2^2 -ն համեմատվող շարքերի ընտրանքային միջինները, ցրվածքները և ծավալներն են, $t_{\alpha, k}$ -ն Ստյոդենտի բաշխման քվանտիլը $\alpha = 0,05$ և $k = n_1 + n_2 - 2$ -ի դեպքում:

Ըստ հաշվարկային ալգորիթմի՝ ստեղծված է հաշվողական ծրագիր (Visual C++, 650 կԲ) (նկ. 2):



Նկ. 2. Հաշվողական ծրագրի ալգորիթմի սխեման

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Степнов М.Н., Шаврин А.В.** Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник.-М.: Машиностроение, 2007.-400с.
2. **Ստակյան Մ.Գ.** Գիտափորձի արդյունքների վիճակագրական մշակման մեթոդները: Ուսումն. ձեռն.-Երևան, ՀՊՃՀ հրատ., 2003.-100 էջ:
3. **Стажян Ю.М.** Алгоритм вероятностной оценки параметров ЭКГ. Сообщ. 2. Дисперсионный анализ и графическая оценка параметров ЭКГ// Вестн. ИАА.-2008.-Т.5, N 1.-С.112-118.
4. **Стажян Ю.М., Маргарян Э.А.** Дисперсионный анализ результатов биомедицинских измерений // Вестник-76: Сб. науч. и мет. ст. ГИУА(П).-2009.-Т.1, ч.1.-С.315-320.

ՀՊՃՀ (Պ): Նյութը ներկայացված է խմբագրություն՝ 02.12.2009:

Э.А. МАРГАРЯН, М.Г. СТАКЯН

**РАСЧЕТНЫЙ АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОДНОФАКТОРНОГО
ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ВАЛОВ**

Обсуждаются задачи совершенствования расчетов сопротивления усталости валов с учетом вероятностного характера действующих факторов. Рассмотрен вопрос уточнения уравнений семейств квантильных линий усталости с учетом вариации дисперсий циклических долговечностей по уровням перенапряжений. Для выполнения вероятностных расчетов создана компьютерная программа для однофакторного дисперсионного анализа вариационных рядов циклических долговечностей.

Ключевые слова: циклическая долговечность, сопротивление усталости, однофакторный дисперсионный анализ, семейство квантильных линий усталости.

E.A. MARGARYAN, M.G. STAKYAN

**DESIGN ALGORITHM AND SOFTWARE OF A SINGLE-FACTOR DISPERSION ANALYSIS
OF SHAFT TEST RESULTS**

Problems for improving shaft fatigue resistance calculations considering probability character of acting factors are discussed. The problem of giving more accurate definition to the fatigue quantile line family equations with a dispersion variation of cyclic productive life according to overstress levels is considered. To perform probability calculations, a computer program for a single-factor dispersion analysis of variational cyclic productive life is developed.

Keywords: cyclic productive life, fatigue resistance, single-factor dispersion analysis, quantile lines of fatigue.

А.И. САГРАДЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ СНИМАЕМОГО СЛОЯ

Исследованием физических закономерностей в процессе резания различных сталей резцами из быстрорежущих сталей и сплавов с интерметаллидным упрочнением выявлено, что в зависимости от изменения степени деформации и коэффициента усадки стружки можно определить оптимальные скорости резания. Экспериментально подтверждено, что при обработке различных сталей типа сталь 45, 2Х13, сырой Р18 резцами из Р6М5, В14М7К25 имеет место сложный экстремальный характер кривых $\xi - f(v)$, с помощью которых графическим методом для каждой пары резец-обрабатываемый материал с достаточной точностью определены оптимальные скорости резания, соответствующие 60-минутной стойкости инструмента – V_{60} , обеспечивающие экономичную производительность и эксплуатационную надежность.

Ключевые слова: деформация, усадка стружки, оптимальная скорость, нарост, стойкость, производительность.

В настоящее время оптимальные режимы резания для каждой пары резец-обрабатываемая деталь определяются в широком диапазоне изменения режимов резания (v, s, t) в зависимости от продолжительности резания с помощью кривых “износ-время” путем установления оптимальных величин износа по задней главной поверхности инструмента.

На основании закономерностей $h_z - f(T)$ посредством построения зависимостей $T - f(v)$ для каждой пары резец-обрабатываемый материал определена V_{60} , которая принимается за базовый параметр режимов резания [1,2]. При этом оптимальная скорость резания зависит от многих факторов: физико-механических характеристик инструментальных и обрабатываемых материалов, геометрических параметров режущего инструмента, от которого зависит деформация обрабатываемого материала и сходящей стружки. Деформация сходящей стружки характеризуется величиной усадки, которая связана с температурой зоны контакта и динамическими характеристиками процесса в зависимости от скорости резания [3].

Целью работы является определение оптимальных скоростей резания в зависимости от величины усадки стружки при обработке различных сталей. При определении оптимальных скоростей резания по критериям оптимального износа и кривых зависимостей стойкость – скорость $(T - V)$ обеспечивается достаточно высокая точность, при этом затраты материалов и времени большие.

С этой точки зрения, предлагаемый метод определения оптимальной скорости резания в зависимости от величины коэффициента усадки стружки, как качественной характеристики деформирования обрабатываемого материала, обеспечивает требуемую точность, одновременно резко сокращая затраты обрабатываемых и инструментальных материалов, а также время экспериментальных исследований.

Эксперименты проведены на станке 16К20, оснащённом вариатором ВР-1. Исследования велись при обработке сталей типа сталь 45, 2Х13, Р18 резцами из быстрорежущих сталей Р6М5 и сплавов с интерметаллидным упрочнением В14М7К25.

Усадку стружки определяли весовым методом $K_1 = G \cdot 10^3 / L_c \rho$ (ст. Проведена регистрация величины нароста и структуры инструмента в сечении перпендикулярно главной режущей грани по середине контакта сходящей стружки с передней поверхностью резца, которое фотографировалось на микрорентгеноспектральном электронном микрозонде VEGA TS-5130ММ.

Для определения величины коэффициента усадки стружки был применен весовой метод и построены графики зависимостей $\xi - f(v)$ (рис. 1). Необходимо отметить, что на низких скоростях резания минимальные значения усадки стружки наблюдаются при максимальных значениях нароста, когда фактический передний угол увеличивается от $\gamma_{\text{опт}} = 10^\circ$ до $\gamma_{\text{фак}} = 35^\circ$ (рис. 2), а деформация как в первичной, так и вторичной зонах снижается до минимума, одновременно сокращая энергетические расходы. Однако указанные скорости при эксплуатации не обеспечивают качество обработанной поверхности и экономичной производительности. Поэтому скорости, соответствующие зонам наростообразования, используются при обдирочных работах деталей, полученных методомковки или литья, в основном, для снятия корки.

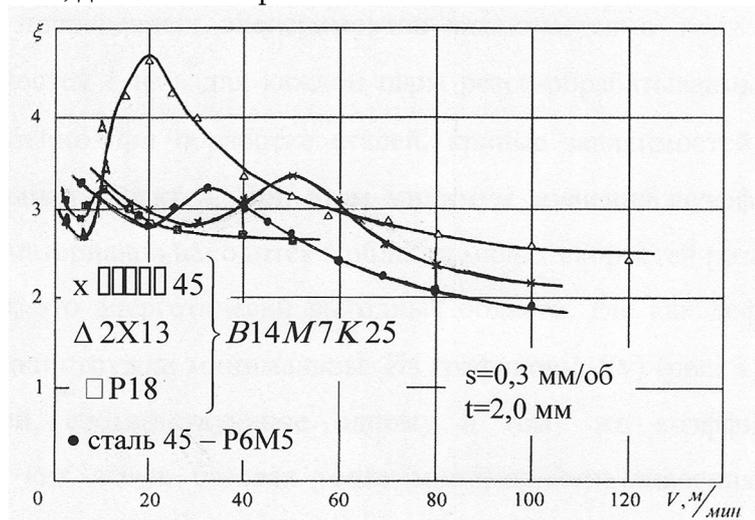


Рис. 1. Зависимость усадки стружки от скорости резания при обработке различных сталей

Для установления величин оптимальных скоростей резания указанных материалов резцами из P6M5, B14M7K25 нами предложен графический метод определения V_{60} , используя графики зависимостей $\xi - f(v)$ при $s=0,30$ мм/об, $t=2,0$ мм (рис. 1).

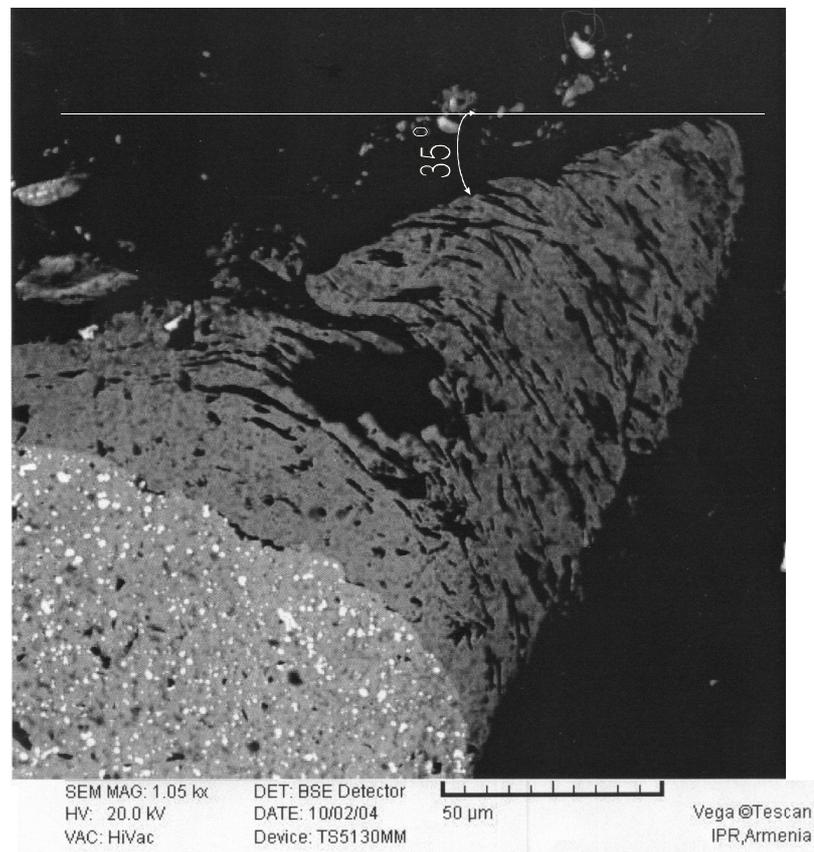


Рис. 2. Сканированный участок шлифа с наростом при обработке стали 45 резцами из B14M7K25 с режимами: $v=35$ м/мин, $s=0,3$ мм/об, $t=2,0$ мм, $\times 1050$

Сущность проведенных экспериментов заключается в том, что, исходя из графиков зависимостей $\xi - f(v)$, для каждой пары резец-обрабатываемый материал V_{60} определяется особенно при обработке сталей, кривые зависимостей $\xi - f(v)$ которых имеют экстремальный характер. При этом минимум значения коэффициента усадки для исследуемых материалов находится в области малых скоростей резания (рис. 1).

Безусловно, это энергетически выгодные области, где как деформация, так и коэффициент усадки стружки минимальны. Из графиков $\xi - f(v)$ (рис. 3) видны две области скоростей, соответствующие одному и тому же коэффициенту усадки стружки. Но так как левая, базовая точка минимального значения коэффициента

стружки (рис. 1) не обеспечивает требуемого качества поверхности и производительность обработки, то выбираем скорость резания с правой стороны максимума кривой $\xi - f(v)$, соответствующей минимальному значению усадки стружки для данной пары резец-обрабатываемый материал и значению оптимальной скорости V_{60} (рис. 3).

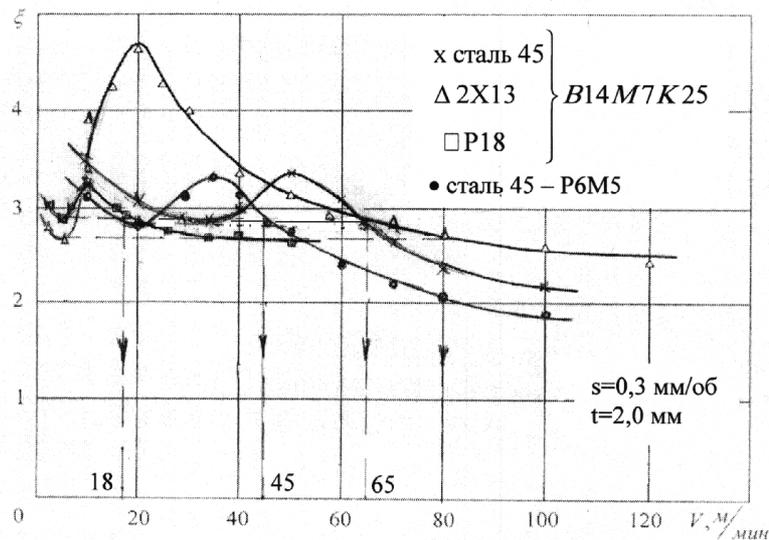


Рис. 3. Определение оптимальной скорости резания в зависимости от величины минимальной усадки стружки

Суть графического метода заключается в определении оптимальной скорости V_{60} с помощью кривых $\xi - f(v)$. Для этого с точки минимального значения усадки стружки кривой $\xi - f(v)$ проведем горизонтальную линию до пересечения с точкой, находящейся на правой стороне максимума кривой $\xi - f(v)$ (рис. 3), затем из этих точек проведем вертикальные линии до пересечения с осью абсцисс, показывающие скорость резания. В результате для каждой пары резец-обрабатываемая деталь получены скорости резания соответствующих скоростей с минимальной деформацией сходящей стружки.

Экспериментально подтверждено, что скорости резания, полученные графическим методом с использованием результатов зависимостей $\xi - f(v)$ (рис. 3), для исследуемых пар практически совпадают со значениями оптимальных величин V_{60} , определенных классическим методом (см. табл.).

В [3] приведены величины оптимальных скоростей резания V_{60} , определенные классическим методом, и соответствующие значения усадки стружки для каждой пары резец-обрабатываемая деталь (см. табл.).

Усадка стружки при точении на скорости резания, соответствующей
60-минутной стойкости

Материал резца	В14М7К25			Р6М5
Материал детали	сталь 45	2Х13	Р18	сталь 45
$V_{\text{опт}}$ м/мин	65	80	17,5	45
ξ	2,90...2,95	2,6...2,8	2,9...3,0	2,9...3,0

Необходимо отметить, что преимущество графического метода бесспорно, так как материальные и энергозатраты несравнимы с классическим методом, а затраченное на исследование время на несколько порядков меньше.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что при обработке различных сталей в зависимости от степени деформации сходящей стружки в процессе резания резцами из быстрорежущих сталей и сплавов с помощью кривых зависимостей усадки стружки от скорости резания $\xi - f(v)$ графическим методом можно определить оптимальную 60-минутную скорость – V_{60} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бобров В.Ф.** Основы теории резания металлов.-М.: Машиностроение, 1975.-358 с.
2. **Кабалдин Ю.Г.** Закономерности наростообразования при резании металлов // Вестник машиностроения. – 1995. – N 5. – С. 17-23.
3. **Сагрядян А.И.** Исследование усадки стружки при обработке сталей и сплавов резцами из различных инструментальных материалов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2005. – Т. LVIII, N 1. – С. 24-30.

ИППФ НАН РА. Материал поступил в редакцию 17.01.2010.

Ա.Ի. ՍԱՀՐԱԴՅԱՆ

ՏԱՐԲԵՐ ՊՈՂՊԱՏՆԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԸՆԹԱՑՔՈՒՄ ԿՏՐՄԱՆ ԼԱՎԱՐԿՎԱԾ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ՝ ԿԱԽՎԱԾ ՀԵՌԱՑՎՈՂ ՏԱՇԵՂԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻՑ

Կտրման պրոցեսում, կախված հեռացվող տաշեղի պլաստիկ դեֆորմացման աստիճանից, առաջարկվող գրաֆիկական մեթոդով «կծկման գործակից –կտրման արագություն» ξ - $f(v)$ կախվածության էքստրեմալ բնույթի գրաֆիկների միջոցով հետազոտվող «գործիք-մշակվող դետալ» յուրաքանչյուր զույգի համար բավականաչափ բարձր ճշտությամբ, նյութական, էներգետիկ և ժամանակի նվազագույն ծախսերով որոշվում է 60-ը կայունությանը համապատասխան կտրման արագությունը, որն ապահովում է մշակվող մակերևույթի անհրաժեշտ որակ, արտադրողականություն և շահագործման հուսալիություն:

Առանցքային բաներ. դեֆորմացիա, տաշեղի կծկվածք, լավարկված արագություն, մակաճ, կայունություն, արտադրողականություն:

A.I. SAHRADYAN

CUTTING OPTIMUM SPEED INVESTIGATION FOR MACHINING STEELS DEPENDING ON DEFORMATION DEGREE OF LAYER REMOVING BY CUTTERS MADE OF HIGH-CUTTING STEELS AND ALLOYS

Studying the cutting process of different steels, for example, steel 45, 2X13, raw P18, with cutters made of high-cutting steels P6M5 and alloys with intermetallide strengthening of the type B14M7K25 shows that it is possible to define optimum cutting speeds depending on changing the degree of plastic deformation and the coefficient of chip shrinkage. Using extremal curves of dependence ξ - $f(v)$ the cutting V_{60} optimum speeds are defined with sufficient precision by the graphic method for each pair of cutter-machining material. The speeds correspond to the 60-minute instrument stability providing the quality of machined surface for economical production and maintenance reliability.

Keywords: deformation, chip shrinkage, optimum speed, outgrowth, stability, production.

Г.А. ГЕВОРКЯН

ПРИЛОЖЕНИЕ ОБОБЩЁННОГО МЕТОДА НЬЮТОНА-ЭЙЛЕРА К ЗАДАЧАМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ УПРУГИХ МЕХАНИЗМОВ

Получены результаты, достигнутые при моделировании упругих динамических систем как с разомкнутыми, так и с замкнутыми кинематическими цепями, которые послужили надёжными предпосылками для приложения обобщённого метода Ньютона-Эйлера к задачам оптимального управления упругих механизмов.

Ключевые слова: следящий манипулятор, упругие деформации, траектория движения исполнительного органа, минимизация функции отклонения.

Введение. В предлагаемой статье приводятся итоги решения задачи точного воспроизведения заданной траектории движения исполнительного органа упругим манипулятором. В качестве воспроизводимой траектории движения предварительно выбирается окружная траектория, а в роли следящей динамической системы выступает трёхзвенный манипулятор с упругим звеном [1].

В такой постановке задача сводится к динамическому анализу упругого манипулятора в присутствии внешней (дополнительной) склерономной связи, традиционное решение которой ассоциируется с процедурой обращения матрицы масс упругого манипулятора при участии неопределённых множителей Лагранжа.

Предложенная в публикации [2] методика освобождения механизмов от внешних голономных связей с приложением эквивалентных внешних усилий к формально-свободным моделям этих систем позволяет аналогичным образом и при поддержке стандартных расчётных процедур произвести динамический анализ рассматриваемого следящего манипулятора в присутствии дополнительной связи обобщённым методом Ньютона-Эйлера, как это производилось для динамических систем с разомкнутыми кинематическими цепями в работах [3 - 5].

1. Формулировка задачи оптимального управления. Рассмотрим трёхзвенный манипулятор (рис. 1), состоящий из неподвижной и недеформируемой опорной стойки C_0 , абсолютно жёсткого звена C_1 и упругого звена C_2 . Предполагая связи между звеньями идеальными, поместим упругий манипулятор в потенциальное поле силы тяжести.

Когда звено C_2 предполагается абсолютно жёстким, конец второго звена A_3 в точности описывает дугу окружности $A_3A'_3$ (рис. 1) при движении манипулятора с законами, удовлетворяющими условию $A_1A_3 = R = \text{Const}$. Очевидно, что это условие обеспечивается лишь в том случае, если замкнутый контур $A_1A_2A_3A_1$ сохраняется неизменным на протяжении всего интервала действия следящего манипулятора.

Когда же звено C_2 принимается упругим, точное воспроизведение желаемой траектории путём односложного выбора законов движения не представляется возможным. В

самом деле, вследствие упругих перемещений проблема соблюдения постоянства кривизны траектории точки A_3 сводится к задаче минимизации функции отклонения свободного конца A_3 от заданной окружной траектории. А это означает, что воспроизводимая траектория выражает не что иное, как дополнительную геометрическую связь, накладываемую на движение упругого трёхзвенного манипулятора [1]. Эта внешняя склерономная связь подчиняется следующему тригонометрическому уравнению:

$$\begin{aligned} & [L_1 \cos(q_1^r) + L_2 \cos(q_1^r + q_2^r) - u_2^y \sin(q_1^r + q_2^r)]^2 + \\ & + [L_1 \sin(q_1^r) + L_2 \sin(q_1^r + q_2^r) + u_2^y \sin(q_1^r + q_2^r)]^2 = R^2; \quad (1) \\ & |L_1 - L_2| \leq R \leq |L_1 + L_2|, \end{aligned}$$

где $\omega = \text{Const}$ - угловая скорость вращения контура $A_1 A_2 A_3$ относительно оси вращения, проходящей через точку A_1 .

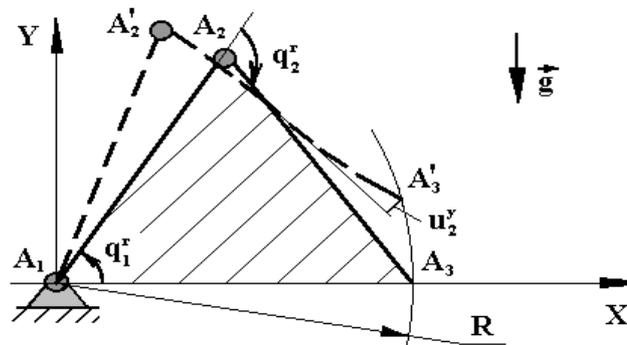


Рис. 1

Длины звеньев C_1 и C_2 следящего манипулятора предположим равными радиусу описываемой окружности, т.е. $R = L_1 = L_2 = 0,35$ м, в результате чего замкнутый контур $A_1 A_2 A_3 A_1$ отождествляется с правильным треугольником. Поперечные сечения звеньев будем полагать круглыми с радиусами $r_1 = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м и $r_2 = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м, массы звеньев равными $m_1 = 0,309$ кг и $m_2 = 0,0772$ кг, а модуль продольной упругости второго звена $E_2 = 200$ ГПа.

Ограничиваясь рассмотрением одной изгибно-упругой степени свободы звена C_2 , т.е. $N_2 = N_2^y = 1$, зададим начальные условия в обобщённых координатах и скоростях: $q_1^r(0) = \pi/3$ рад, $q_2^r(0) = -2\pi/3$ рад и $\dot{q}_1^r(0) = 10$ рад/с, $\dot{q}_2^r(0) = 0$. Движение исследуемого манипулятора происходит в интервале $t \in [0, T]$, где $T = 0,7$ с, по следующим законам: $\omega \equiv \dot{q}_1^r$, $\dot{q}_1^r(t) = 10$ рад/с и $\dot{q}_2^r(t) = 0$, которые формулируют условие обращения замкнутого контура $A_1 A_2 A_3 A_1$ как жёсткого целого вокруг оси вращения, проходящей через точку A_1 .

Процесс численной реализации динамического расчёта предполагается производить в два этапа с применением явной схемы численного интегрирования Ньюмарка. Первый этап усматривает симуляцию движения трёхзвенного манипулятора при отсутствии внешней

геометрической связи (1), тогда как второй этап подразумевает моделирование задачи в общей постановке, т.е. в присутствии дополнительной связи (1).

2. Тестирование задачи при отсутствии внешней связи. Предлагаем результаты первого теста численной реализации динамического анализа упругого манипулятора, полученные при начальных условиях для упругой переменной $q_2^e(0) = \dot{q}_2^e(0) = 0$. Предпринятая реализация теста осуществлена на платформе описанных в [3] алгоритмических процедур при шаге $\Delta t = 10^{-5} c$ явной схемы численного интегрирования Ньюмарка. График функции изгибной деформации от времени представлен на рис. 2 а.

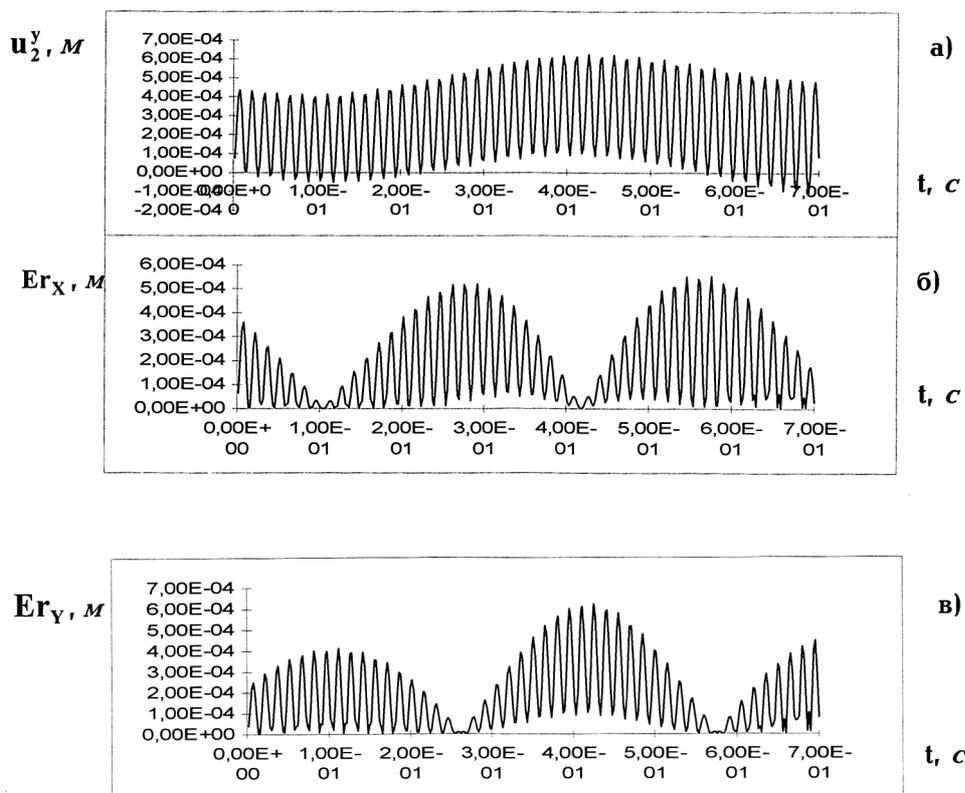


Рис.2

Для оценки отклонения свободного конца A_3 упругого звена C_2 от заданной окружной траектории вследствие деформирования предусматривается функция погрешности Er , которая в проекциях на оси неподвижной системы координат OXY определяется следующими равенствами:

$$\begin{cases} Er_x = |R_x - R_x^*| = |R \cos(\omega t) - [L_1 \cos(q_1^r) + L_2 \cos(q_1^r + q_2^r) - u_2^y \sin(q_1^r + q_2^r)]|; \\ Er_y = |R_y - R_y^*| = |R \sin(\omega t) - [L_1 \sin(q_1^r) + L_2 \sin(q_1^r + q_2^r) + u_2^y \cos(q_1^r + q_2^r)]|. \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 2 б и в приводятся графики изменения проекций (2) функции E_{Γ} во времени, генерированные вследствие произведённого теста.

3. Тестирование задачи в присутствии внешней связи. Теперь рассмотрим особенности численной реализации обратной задачи динамики следящего упругого манипулятора [1] в присутствии внешней связи (1). Любопытно отметить, что при $\ddot{u}_2^y(A_3, 0) = u_2^y(A_3, 0) \text{tg}(q_1^r + q_2^r)$ имеет место $\ddot{u}_2^y(A_3, t) \equiv 0$, а из этого следует, что при задании начальных условий изгибной деформации и скорости деформации в точке A_3 в виде $u_2^y(A_3, 0) = 10^{-5} \text{ м}$ и $\dot{u}_2^y(A_3, 0) = -1,732 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ сохраняется строго линейная зависимость поперечной деформации звена C_2 от времени.

Тест численной реализации поставленной задачи при начальных условиях $u_2^y(A_3, 0) = 10^{-5} \text{ м}$ и $\dot{u}_2^y(A_3, 0) = -7.0 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ шага интегрирования $\Delta t = 10^{-4} \text{ с}$ явной схемы Ньюмарка осуществлен на базе алгоритма обобщённого метода Ньютона-Эйлера с предварительным подсчётом множителей Лагранжа кодом, предполагающим обращение матрицы масс следящего манипулятора. Результаты теста приводятся на рис. 3 а, б и в.

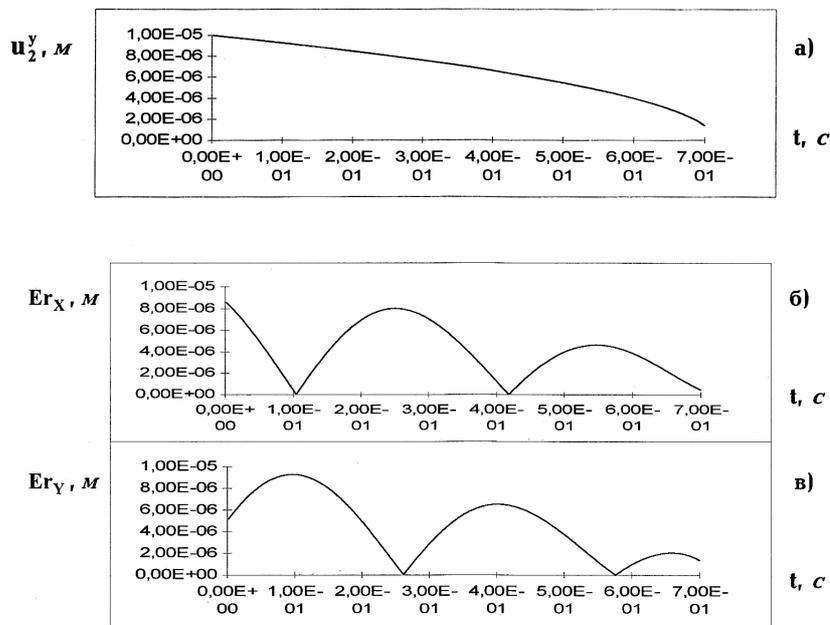


Рис.3

Заключение. Представленное решение задачи минимизации функции отклонения рабочей траектории движения исполнительного органа трёхзвенного упругого манипулятора свидетельствует о хорошей адаптируемости обобщённого метода Ньютона-Эйлера к задачам оптимального управления упругих динамических систем циклического действия.

Как уже отмечалось в [2], обоснованность применения формализма Ньютона-Эйлера к решению данного класса задач тем больше, чем меньше возникает необходимость в расчётах и в перерасчётах неопределённых множителей Лагранжа. Последние подлежат нахождению посредством алгоритмических кодов, использующих процедуру обращения матрицы масс [2], и образуют усилия дополнительной связи, воздействующие на формально-свободную упругую динамическую систему в роли функций управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pascal M. and Gagarina T.** A pseudo-rigid model for the dynamical simulation of flexible mechanisms // *Multibody System Dynamics*. - 1999. - V. 3. - P. 303 - 331.
2. **Геворкян Г.А.** Динамический анализ упругих древовидных механических систем в присутствии внешних голономных связей // *Information Technologies and Management*. - Encyclopedia-Armenica. - 2004. - N4. - С. 36 - 43.
3. **Саркисян Ю.Л., Степанян К.Г., Азуз Н., Геворкян Г.А.** Динамический анализ упругих манипуляторов обобщённым методом Ньютона-Эйлера // *Известия НАН РА и ГИУА. Сер.ТН*. - 2004. - Т. 57, N1. - С. 3 - 10.
4. **Саркисян Ю.Л., Степанян К.Г., Геворкян Г.А.** Динамический анализ упругих древовидных механических систем без внешних связей // *Известия НАН РА и ГИУА. Сер.ТН*. - 2006. - Т. 59, N1. - С. 3 - 9.
5. **Геворкян Г.А.** Динамический анализ пространственных упругих манипуляторов обобщённым методом Ньютона-Эйлера // *Сб. научных трудов межд. н.-т. конф., посв. 65-летию деп. "Машиностроение" ГИУА*. - 2010. - С. 126 - 128.

ГИУА (П). Материал поступил в редакцию 17.04.2010.

Հ.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

**ՆՅՈՒՏՈՆ-ԷՅԼԵՐԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ ՄԵԹՈԴԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՌԱՋԳԱԿԱՆ
ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐՈՒՄ**

Առաձգական դինամիկական համակարգերի մոդելավորման ոլորտում ստացված նոր արդյունքները, որոնք վերաբերում են ինչպես բաց, այնպես էլ փակ կինեմատիկական շղթաներով մեխանիզմներին, հուսալի նախադրյալներ են ստեղծել առաձգական մեխանիզմների օպտիմալ կառավարման խնդիրներում Նյուտոն-Էյլերի ընդհանրացված մեթոդի կիրառության համար:

Առանցքային բառեր. հետևող մանիպուլյատոր, առաձգական դեֆորմացիաներ, կատարողական օղակի շարժման հետագիծ, շեղման ֆունկցիայի նվազեցում:

H.A. GEVORGYAN

**AN APPLICATION OF THE GENERALIZED NEWTON-EULER
METHOD IN THE OPTIMAL CONTROL PROBLEMS
OF FLEXIBLE MECHANISMS**

New results achieved on dynamic simulation of open-loop and closed-loop flexible systems by means of the generalized Newton-Euler method are presented. A new application of the generalized Newton-Euler model in the optimal control problems of elastic mechanisms is shown.

Keywords: tracing manipulator, elastic deformations, motion trajectory of executive board, deviation function minimization.

С.Г. АГБАЛЯН, Г.Х. КАРАПЕТЯН, А.А. ПЕТРОСЯН,
А.С. АГБАЛЯН

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА

Определена роль каждой структурной составляющей в процессе трения и обоснованы их параметры: размеры частиц: матрицы (первая фаза) – < 60 мкм; твердой смазки (вторая фаза) – $8...12$ мкм (объемное содержание $10...15\%$); интерметаллидов (третья фаза) – $0,5...2,0$ мкм (объемное содержание $10...15\%$). Показано, что при оптимальном содержании твердой смазки образование вторичной структуры гарантируется при соотношении коэффициентов объемного расширения структурных составляющих $KOPM > KOP_{т.с.}$.

Ключевые слова: трение, матрица, твердая смазка, интерметаллидная фаза, вторичная структура, коэффициент объемного расширения.

Антифрикционные материалы с низким коэффициентом трения – наиболее распространенный вид продукции порошковой металлургии. Основным свойством, обуславливающим широкое применение этих материалов в технике, является их способность работать продолжительное время без дополнительной подачи смазки, т.е. в режиме так называемой “самосмазываемости”. Однако попытки применения пористых материалов в узлах трения при чрезмерно легких (нагрузки и скорости соответственно менее $0,1$ МПа и $0,1$ м/с) и тяжелых (соответственно более 10 МПа и $4...10$ м/с) режимах работы не увенчались успехом.

Основной причиной выхода из строя пористых деталей машин является схватывание, возникающее при достижении внешней нагрузки или скорости скольжения критических величин. Это объясняется тем, что пленка смазочного материала либо разрушается, либо выгорает. Кроме того, наблюдается фильтрация смазки через поры, что существенно снижает гидродинамическое давление в зоне трения и, тем самым, несущую способность материала. В местах контакта возникают также температурные зоны, которые вызывают локальное разупрочнение и разрушение. К этому следует добавить, что структурная пористость резко снижает теплопроводность, а сами поры, являясь концентраторами напряжений, вызывают ускоренный износ.

Согласно молекулярно-механической теории трения, внешнее трение осуществляется с минимальной работой в том случае, когда прочность адгезионной связи между контактируемыми поверхностями меньше прочности нижележащих поверхностных слоев, т.е. когда имеет место положительный градиент механических свойств по глубине. В этом случае вся деформация при трении будет

сосредотачиваться в тонком поверхностном слое, предотвращая его от катастрофического разрушения и глубинного вырывания. В связи с этим в подшипниках скольжения широкое применение находят твердые смазки (сульфиды, селениды, фториды, фосфиды и т.д.), которые образуют на поверхности трения защитные пленки (вторичные структуры) и сохраняют работоспособность узлов в возможно большом диапазоне скоростей и нагрузок, в том числе и экстремальных.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы является исследование механизма образования вторичных структур в процессе трения и износа.

Эксперименты проводились на материалах Fe – Mo – MoS₂. Как показали исследования, поверхностная пленка формируется в процессе приработки (рис. 1). С формированием на поверхностях трения вторичных структур коэффициент трения снижается (рис. 2), а с образованием устойчивой пленки – стабилизируется (кривая 1).

Общая площадь (S) пленки представляет собой сумму поверхностей (S_i) всех зерен (m) второй фазы, располагаемой на поверхности трения, т.е.

$$S = \sum_{i=1}^m S_i.$$

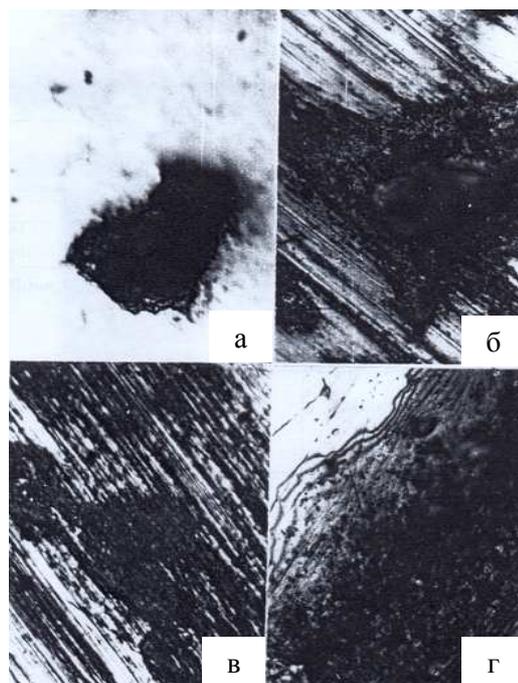


Рис.1. Металлография формирования вторичных структур на поверхностях трения (x400) (Fe-Mo-MoS₂, P=1 МПа, V=1 м/с, трение сухое): а – до работы; б – 5 мин после работы; в – 10 мин после работы; г – 15 мин после работы

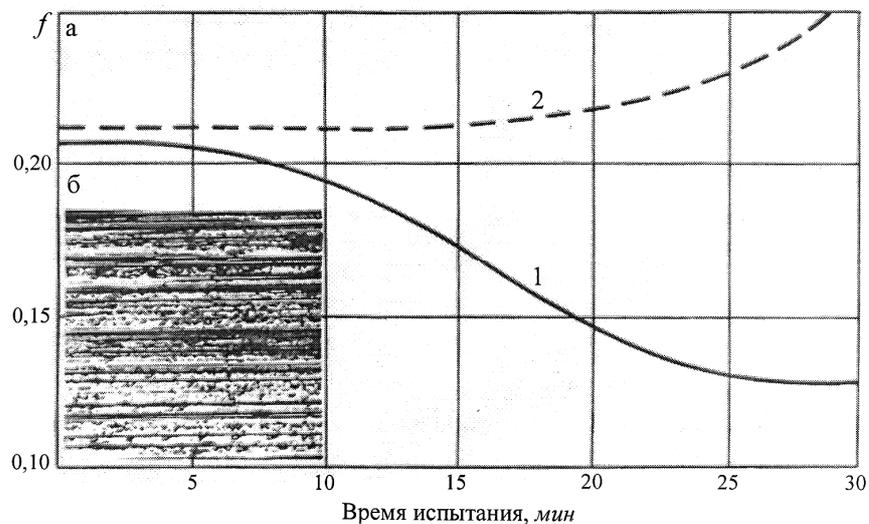


Рис. 2. Изменение коэффициента трения в зависимости от времени испытания (трение сухое, $Q=1$ МПа, $V=1$ м/с): 1- FeMo+MoS₂ (MoS₂=20%); 2 – FeMo

Эта зависимость графически изображена на рис. 3. Последующие эксперименты подтверждают, что зерна второй фазы должны иметь оптимальные размеры, так как при чрезмерной мелкозернистости прочность пленки уменьшается, и наблюдается сильный износ (рис. 3).

Как видно из рис. 3, оптимальный размер зерен второй фазы колеблется в пределах 5...15 мкм. Вторичные структуры взаимодействуют с поверхностью основной фазы и образуют пленки толщиной до 0,05 мкм, обеспечивая тем самым работоспособность материала, так как при такой толщине пленки число ориентированных монослоев атомов может достигать нескольких десятков. Например, для графита - 70...80, для дисульфида молибдена - 30...40 и т.д. [1]. Прочность пленки оценивается поверхностным напряжением [2]:

$$\sigma = 5,64 \cdot 10^4 \cdot (\rho/A)^{4/3}, \quad (1)$$

где ρ – плотность металла; A – атомная масса.

Прочность пленки возрастает, если в веществе, образующем вторую фазу, есть элемент или элементы, размеры атомов которых ($r_{II\Phi}$) с атомами элементов основной фазы (r_0) находятся в соотношении

$$r_{II\Phi}/r_0 \leq 0,59.$$

Например, графит на поверхности молибдена образует более прочную пленку, чем на поверхности меди, так как в первом случае $r_{гp}/r_{Mo} = 0,55$, во втором - $r_{гp}/r_{Cu} = 0,6$.

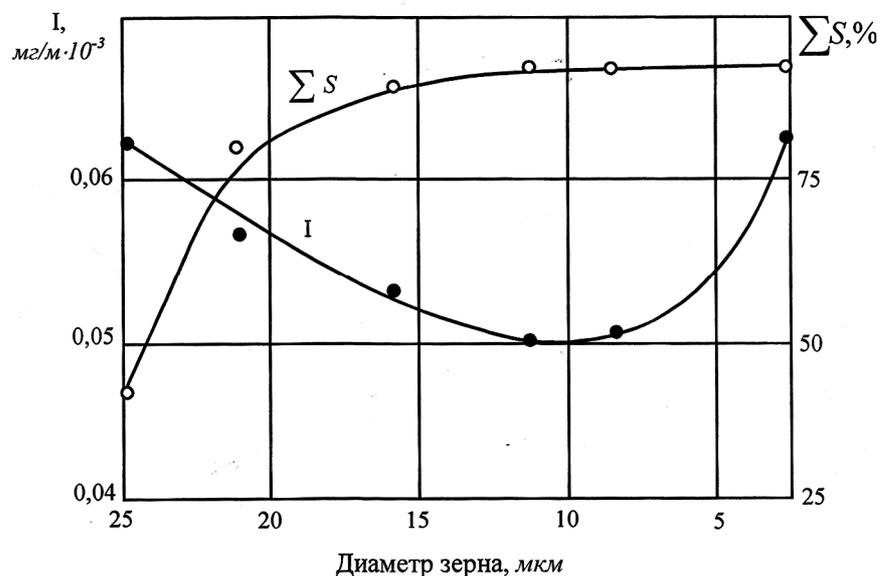


Рис. 3. Изменение износа (I) и суммарной поверхности вторичной структуры в зависимости от зернистости второй фазы (Fe-Mo-MoS₂, Q=1 МПа, V=1 м/с, трение сухое)

Механизм образования поверхностных пленок обусловлен также внешними факторами (P, V), которые интенсифицируют износ (рис. 4). При малых нагрузках и скоростях скольжения время формирования пленки увеличивается. При больших нагрузках, превышающих предел упругости материала, основа материала подвергается пластической деформации, и пленка разрушается. Между трущимися поверхностями возникают межмолекулярные и межатомные силы, следовательно, активизируются диффузионные процессы, и материал теряет работоспособность.

Проведено исследование влияния фазового состава антифрикционных материалов на механизм образования вторичных структур (рис. 5). При малом содержании твердых смазывающих веществ (<15% об.) пленка формируется не по всей рабочей поверхности. Избыточное количество твердой смазки (>25% об.) оказывает отрицательное влияние, снижая физико-механические свойства износостойких антифрикционных порошковых материалов (ИАПМ), и может быть причислено к "продуктам износа". Экспериментально установлено, что толщина пленки составляет 0,1...0,2 мкм.

Определенный интерес представляет химический состав вторичных структур. Однако выявить его имеющимися методами анализа (рентгенофазовый, микрорентгеноспектральный, электронно-графический и т.д.) нам не удалось ввиду малой толщины слоев. По этой причине проводились сравнительные исследования с образцами, в структуре которых отсутствовала вторая фаза (твердые смазывающие

вещества). Как видно из рис. 2, у этих материалов на поверхностях трения отсутствуют вторичные структуры; имеются риски, обусловленные диффузионными процессами, а не деформационными. Кривая 2 на рис. 2 подтверждает подобную точку зрения.

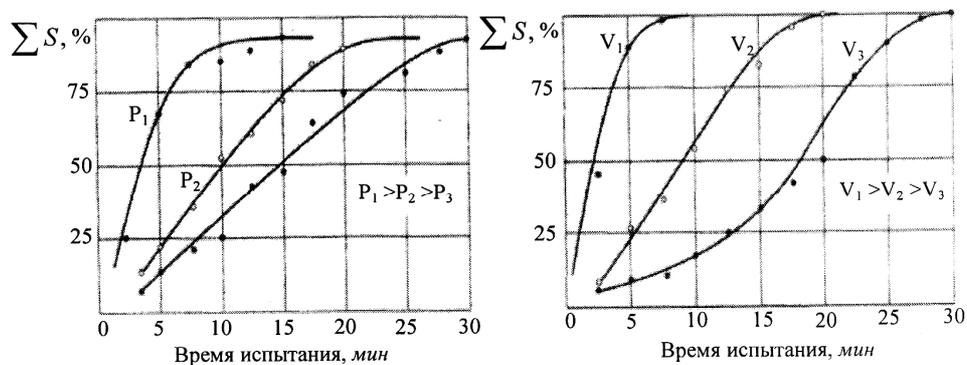


Рис. 4. Интенсивность образования поверхности вторичной структуры в зависимости от внешних факторов (трение сухое, материал Fe-Mo-MoS₂): P₁=1 МПа; P₂=5 МПа; P₃=10 МПа; V₁=1 м/с; V₂=4 м/с; V₃=8 м/с

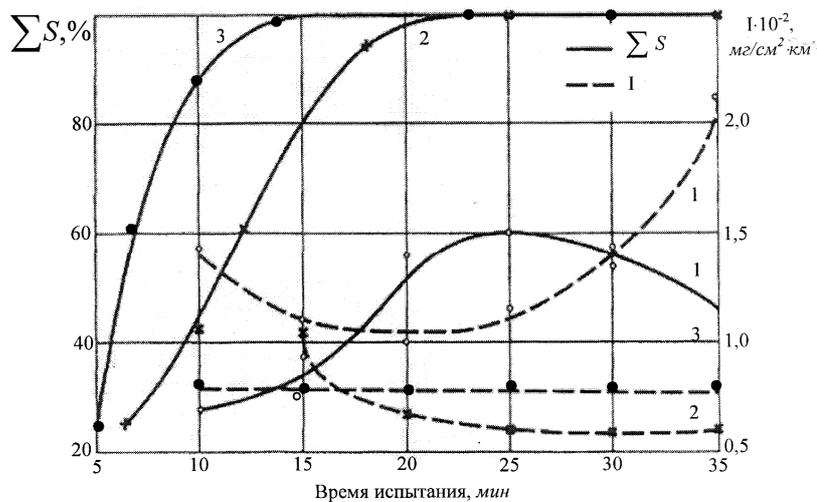


Рис.5. Влияние фазового состава на механизм образования вторичных структур материал FeMo+MoS₂, Q=1 МПа, V=1 м/с, трение сухое): 1 – MoS₂=10% объемн., 2 – MoS₂=20% объемн., 3 – MoS₂=30% объемн.

Проведены исследования по выявлению влияния кристаллической решетки второй фазы на формирование поверхностной пленки. В качестве второй фазы использовались Cu, Fe, Ti, Zn, C. Результаты представлены на рис. 6. Как видно из рисунка, у металлов с гексагональной решеткой коэффициент трения меньше. Кроме того, в зоне трения температура сравнительно низкая. Необходимо отметить, что f и t тем меньше, чем больше соотношение c/a (для α -Ti $c/a=1,59$, для Zn – 1,85, для C – 2,73). Это объясняется тем, что в веществах с гексагональной решеткой скольжение между плоскостями кристаллов происходит по величинам малых сил (для Zn $\rightarrow \tau_s = 90 \text{ г/мм}^2$, для Cu $\rightarrow \tau_s = 200 \text{ г/мм}^2$) [3].

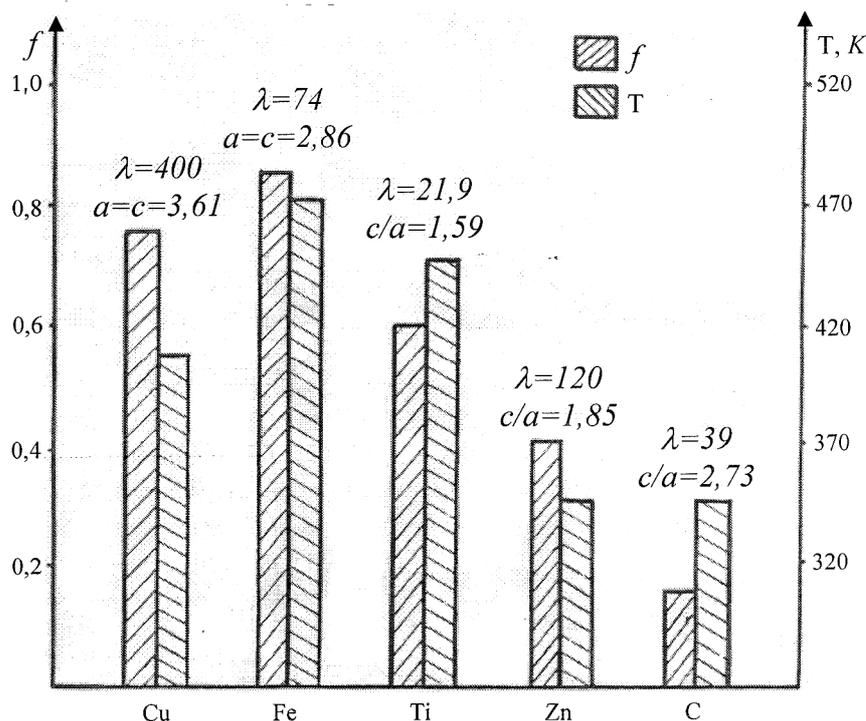


Рис. 6. Изменение коэффициента трения и температуры в зоне трения в зависимости от типа и параметров кристаллической решетки элементов

В трехфазных материалах механизм образования вторичных структур на поверхностях трения тот же, что и в двухфазных. Однако долговечность и работоспособность пленок на поверхностях трехфазных ИАПМ в два и более раза выше, чем на поверхностях двухфазных ИАПМ (рис. 7), что обеспечивается третьей фазой (твердыми частицами).

Под действием касательного напряжения дислокация, перемещаясь, встречает на своем пути препятствие. Дислокация под действием усилия $T = Gb^2/2$, где b - вектор Бюргера, прогибается между препятствиями.

Обозначим угол между прямолинейными отрезками дислокации по обе стороны от препятствия через φ ($\varphi < \pi$). Сила, действующая на одно препятствие со стороны дислокации, как это видно из рис. 8, равна

$$F = 2T \cdot \sin \varphi / 2. \quad (2)$$

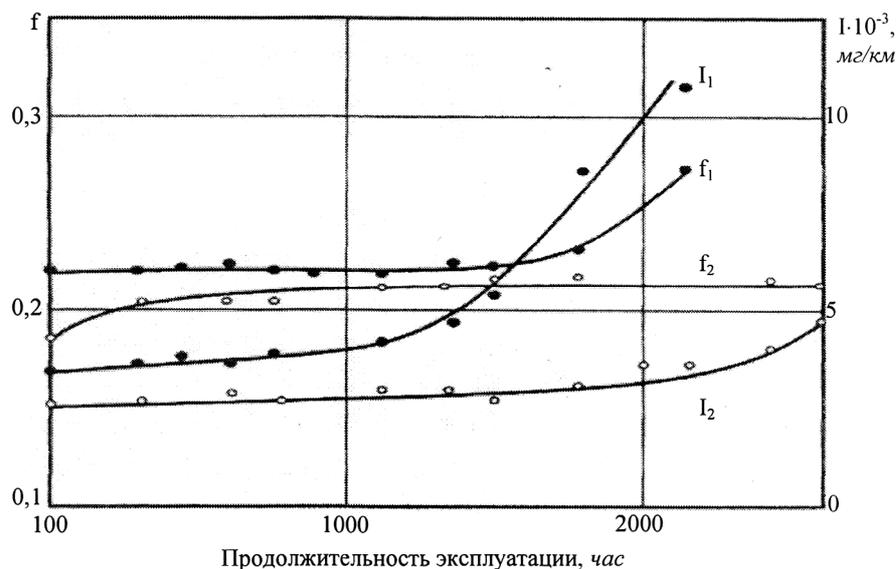


Рис. 7. Зависимость фрикционных свойств двухфазных и трехфазных ИАПМ от продолжительности эксплуатации: 1 - Fe-Mo-MoS₂ (I фаза – размер 45...55 мкм, объем 86...88%; II фаза – размер 10 мкм, объем 12...14%); 2 - Fe-Mo-MoS₂ (I фаза – размер 50...55 мкм, объем 65...78%; II фаза – размер 8 мкм, объем 12%; III фаза – размер 2 мкм, объем 10...25%)

Подставив в (2) значение T , получим силу сопротивления одной твердой частицы (третьей фазы) перемещению дислокации в пленке

$$F = G \cdot b^2 \cdot \sin \varphi / 2 \quad (3)$$

и напряжение, вызванное силой

$$\tau = \frac{G \cdot b}{\ell_0} \sin \varphi / 2, \quad (4)$$

где ℓ_0 – расстояние между твердыми частицами.

На поверхности S пленки напряжение, препятствующее скольжению, будет обусловлено количеством твердых частиц (n):

$$\tau = \frac{n \cdot G \cdot b}{\ell_0} \sin \varphi / 2. \quad (5)$$

Если через n выразим часть твердых частиц в общей площади пленки (a) и площади их поперечного сечения (πR^2), то получим

$$\tau = \frac{a \cdot G \cdot b}{\pi \cdot R^2 \cdot \ell_0} \sin \varphi / 2. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет утверждать, что прочность сформированных на поверхности трения пленок можно увеличить за счет уменьшения зернистости третьей фазы и увеличения ее содержания.

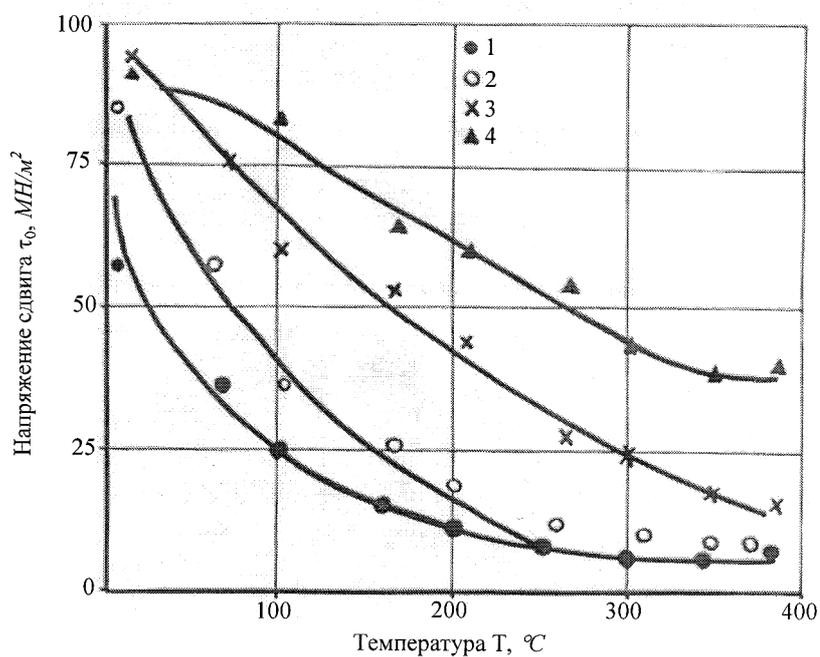


Рис. 8. Изменение напряжения сдвига в зависимости от температуры трения (материал FeMo, $Q=0,5...5,0$ МПа, $V = 2$ м/с): 1 – Mo = 5%; 2 – Mo = 10%; 3 – Mo = 15%; 4 – Mo = 25%

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Брейтуэйт Е.Р.** Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия.-М.: Химия, 1967.-320 с.
2. **Семенченко В.К.** Поверхностные явления в металлах и сплавах.-М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957.-491 с.
3. Физическое металловедение / Под ред. **Р.У. Кана, П.Т. Хаазена.** Т.3: Физико-механические свойства металлов и сплавов: Пер. с англ.-М.: Металлургия, 1987.- 663 с.

ГИУА(П). Материал поступил в редакцию 10.10.2009.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Գ.Խ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ա.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ա.Ս. ԱՂԲԱԼՅԱՆ

ՇՓՄԱՆ ԵՎ ՄԱՀՄԱՆ ԳՈՐԾՆԹԱՅՈՒՄ ԵՐԿՐՈՂՄԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԱՌԱՋԱՅՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄ

Որոշվել է շփման ժամանակ կառուցվածքային յուրաքանչյուր բաղադրիչի դերը և հիմնավորվել են պարամետրերը, մասնավորապես՝ հատիկի մեծությունը: Այն մայրակի համար (առաջին ֆազ) պետք է լինի 60 մկմ-ից փոքր, պինդ քսանյութի համար (երկրորդ ֆազ)՝ 8...12 մկմ (ծավալային պարունակությունը՝ 10...15 %), իսկ ինտերմետաղական ֆազի համար (երրորդ ֆազ)՝ 0,5...2,0 մկմ (ծավալային պարունակությունը՝ 10...15 %): Ցույց է տրված, որ պինդ քսանյութի օպտիմալ քանակության դեպքում երկրորդային կառուցվածքի առաջացումը երաշխավորված է կառուցվածքային բաղադրիչների ծավալային ընդարձակման գործակիցների հետևյալ հարաբերությամբ. $F_{\text{of V.E.m}} > F_{\text{of V.E.f.g}}$:

Առանցքային բառեր. շփում, մայրակ, պինդ քսանյութ, ինտերմետաղական ֆազ, երկրորդային կառուցվածք, ծավալային ընդարձակման գործակից:

**S.G. AGHBALYAN, G.X. KARAPETYAN, A.A. PETROSYAN,
A.S. AGHBALYAN**

SECONDARY STRUCTURE FORMATION MECHANISM IN THE COURSE OF THE FRICTION AND DETERIORATION

The role of each structural component in the course of the friction is defined and their parameters are grounded: in particular the sizes of particles, matrices (the first phase) – <60 mkm; firm greasing (the second phase) – 8...12 mkm (the volume maintenance 10...15 %); intermetallics (the third phase) – 0,5...2,0 mkm (the volume maintenance 10...15 %). It is shown that with optimum firm greasing formation the content of the secondary structure is guaranteed by volume expansion coefficients of structural components $F_{\text{of V.E.m}} > F_{\text{of V.E.f.g}}$.

f.g.

Keywords: friction, matrix, firm greasing, intermetallic phase, secondary structure, factor of volume expansion.

А.М. АМИРДЖАНЫАН, А.А. ГЕВОРГЯН, В.З. МАРУХЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СПРИНКЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ С НЕКОМПЕНСИРУЕМОЙ ТЕЧЬЮ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ИЗ ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС

На примере Армянской АЭС (реактор ВВЭР-440 типа В-270) исследованы процессы, протекающие при авариях с разрывом трубопровода, соединяющего компенсатор давления с “горячей” петлей, с учетом отказа системы аварийного охлаждения активной зоны. Определено влияние работы спринклерной системы на уменьшение количества выбросов продуктов деления в окружающую среду и образование взрывоопасной концентрации водорода в герметичных помещениях. Вероятность такой аварии с наложением дополнительного отказа системы аварийного охлаждения активной зоны очень мала. Для разработки планов по защите персонала и населения дается анализ подобных сценариев. Результаты проведенного анализа показали, что основной вклад в уменьшение количества выбросов продуктов деления в атмосферу вносит спринклерная система. Неработоспособность данной системы приводит к восьмикратному увеличению выбросов.

Ключевые слова: безопасность атомных станций, тяжелые запроектные аварии, выброс продуктов деления.

Введение. Согласно основному принципу безопасности [1], пятым и последним уровнем концепции глубокоэшелонированной защиты является смягчение радиологических последствий потенциальных выбросов радиоактивных материалов, которые могут иметь место в результате возникновения аварий. Для достижения данной цели необходимы планы аварийного реагирования на площадке и за ее пределами. Для адекватного планирования защитных мероприятий следует в первую очередь оценить состояние реакторной установки при аварийном состоянии и на основе этого определить возможное количество выброса продуктов деления в окружающую среду и степень его дальнейшего распространения. Для решения данной задачи прежде всего необходимо исследовать процессы, протекающие при запроектных и тяжелых авариях, так как в этих случаях ожидается наибольшее количество выброса радиоактивных материалов в окружающую среду. Анализ запроектных и тяжелых аварий для Армянской АЭС (ААЭС) был выполнен в рамках переоценки обоснования безопасности проекта [2]. Однако при этом были использованы “консервативные” коды, не базирующиеся на методе наилучшей оценки, что в настоящее время не соответствует современным требованиям по проведению анализов безопасности. Также не были проанализированы все

возможные явления, которые влияют на выброс радиоактивных материалов в окружающую среду, такие как работоспособность спринклерной системы, накопление и возгорание водорода, застревание взрывных клапанов гермозоны (ГЗ), что также является недостатком ранее выполненных работ. Исходя из вышеизложенного, возникла необходимость исследования процессов, протекающих при запроектных и тяжелых авариях, с использованием современных системных кодов, основанных на методе наилучшей оценки (best estimate method), а также определения возможных спектров ожидаемых выбросов радиологических материалов в окружающую среду. В частности, проведен анализ одной из возможных запроектных аварий на Армянской АЭС, а именно: разрыв трубопровода, соединяющего компенсатор давления (КО) с “горячей” петлей, с учетом отказа системы аварийного охлаждения активной зоны. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса MELCOR 1.8.5, который разработан на основе метода наилучшей оценки [3,4].

При выборе граничных условий для указанной аварии учитывался факт, что количество выброса продуктов деления в атмосферу зависит непосредственно от работоспособности спринклерной системы и состояния клапанов ГЗ (возможность “застревания” в открытом состоянии). Исходя из этого, были выбраны следующие граничные условия: предохранительные клапаны (ПК) ГЗ и спринклерная система работоспособны (вариант 1), отказ на закрытие одного из ПК ГЗ (вариант 2), отказ спринклерной системы (вариант 3), отказ на закрытие одного из ПК ГЗ и неработоспособность спринклерной системы (вариант 4). Очевидно, что данная выборка покрывает весь спектр возможных выбросов для выбранной аварии.

При анализе было сделано допущение, что с момента возникновения исходного события и в течение аварии оператор не предпримет каких-либо действий. Расчетное время составляет 70000 с.

1. Методика расчетов. Для решения поставленной задачи в работе разработана математическая модель, предназначенная для оценки процессов, протекающих в первом и во втором контурах, в активной зоне и в ГЗ второго блока Армянской АЭС, а также для определения количества выброса продуктов деления в окружающую среду на базе программного пакета MELCOR 1.8.5.

Программный пакет MELCOR разработан в Национальной лаборатории Sandia (США) и является интегральным кодом, предназначенным для моделирования всего спектра явлений, сопровождающих тяжелые аварии на АЭС с легководными реакторами.

Моделированы все важнейшие системы первого и второго контуров и ГЗ, а также системы безопасности и контроля. При построении модели были использованы данные [5,6]. Модель реактора содержит опускной участок (CV010), эллиптическое днище (CV011), нижнюю камеру реактора (CV012), активную зону (CV013, CV014), верхнюю камеру (CV015, CV016) и подколпачное пространство

(CV017) (рис. 1.1). Активная зона разделена на два объема, которые имитируют объем, занимаемый топливными элементами, и байпас активной зоны. Шесть петель реакторной установки смоделированы двумя петлями, одна из которых соответствует реальной петле, а вторая является комбинацией остальных пяти петель. Модель каждой петли содержит модели холодной и горячей ниток, парогенератора, главного циркуляционного насоса (ГЦН).

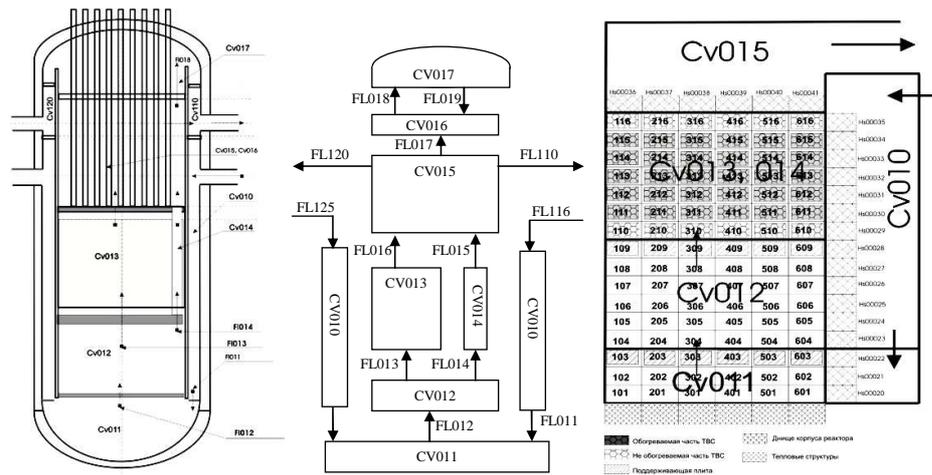


Рис. 1.1. Расчетная схема реактора

КД двумя трубопроводами соединен с одной из петель. В модель КД включены нагреватели, линия “холодного” впрыска и ПК.

Разбиение активной зоны для пакета MELCOR произведено для конфигурации, когда все кассеты, автоматически регулирующие и компенсирующие (АРК), находятся в верхнем положении. Активная зона смоделирована шестью концентрическими зонами с различными энерговыделениями, характеризуемыми коэффициентами неравномерности K_f . Активная часть рабочих тепловыделяющих сборок (ТВС) и АРК разбита на 5 участков по высоте. Смоделированы 3 поддерживающие плиты, представленные в виде элемента PLATE.

Модель гермообъема включает в себя модель герметических помещений, состоящую из 20-ти контрольных объемов, тепловые структуры, имитирующие бетонные стены помещений и стальные корпуса оборудования, и модель спринклерной системы (рис 1.2).

Для анализа были выбраны номинальные параметры реакторной установки. Начальное количество продуктов деления в активной зоне определено на основе расчетов, проведенных программой ORIGEN [7]. Характеристика величины утечки из гермообъема основана на результатах испытаний системы герметичных помещений блока 2 Армянской АЭС [8].

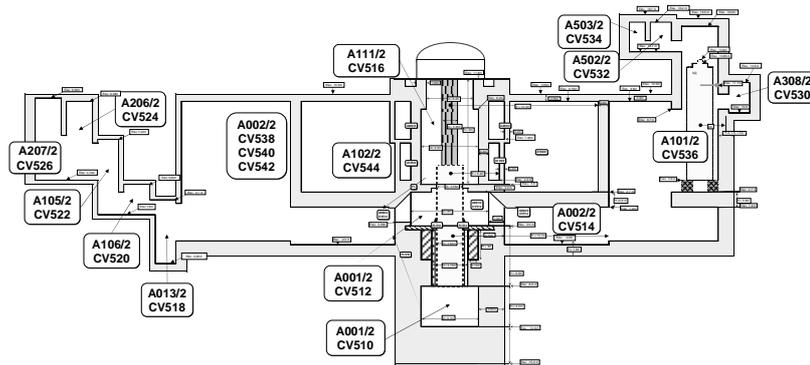


Рис. 1.2. Расчетная схема гермозоны

2. Результаты расчета и их анализ

2.1. Анализ процессов, происходящих в реакторе. Исходным событием для всех анализируемых вариантов аварии является разрыв на стыке соединительного трубопровода КД и “горячей” петли. На первых секундах аварии из-за утечки теплоносителя через разрыв давление в первом контуре быстро падает (рис. 2.1), что приводит к парообразованию и тем самым к понижению уровня теплоносителя в реакторе (рис. 2.1). Последнее приводит к оголению твэлов и, как следствие, к ухудшению теплообмена между твэлами и теплоносителем. Результатом этого является повышение температуры оболочек твэлов в верхней части активной зоны (рис. 2.2), которая на 700 с достигает значения 1200°C.

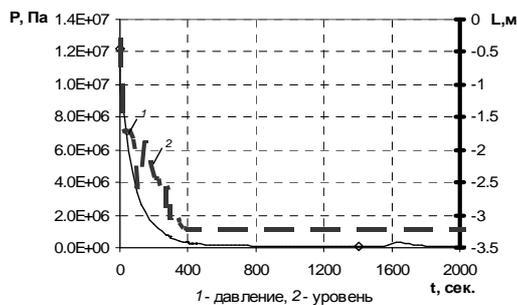
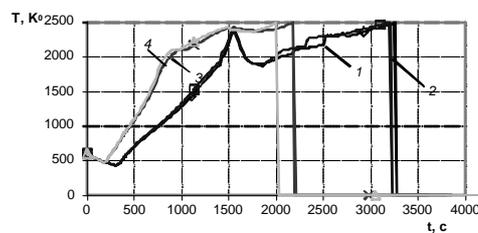


Рис. 2.1. Давление в первом контуре и уровень теплоносителя в активной зоне



1- 1-я радиальная зона 11 -го аксиального сегмента, 2- 3-я радиальная зона 11-го аксиального сегмента, 3- 1-я радиальная зона 14-го аксиального сегмента, 4- 3-я радиальная зона 14-го аксиального сегмента

Рис. 2.2. Температура оболочек твэлов в активной зоне

После чего скорость роста температуры оболочек повышается за счет появления самоподдерживающейся парциркуниевой реакции, которая приводит к окислению

оболочек твэлов и выработке дополнительной энергии. К 800-й с температура оболочек твэлов достигает температуры плавления циркония, и начинается процесс плавления оболочек. В интервале времени 1900...2075 с температура оболочек твэлов в 14-ом аксиальном сегменте достигает температуры разрушения окисной пленки, и начинается процесс разрушения и перемещения топлива на опорную плиту активной зоны.

Разрушение опорной плиты активной зоны имеет место на 3900-й с, после чего начинается процесс перемещения кориума в днище шахты и эллиптическое днище и повышается его температура. При достижении 1400°C на 16300-й с происходит разрушение днища и дальнейшее передвижение кориума в шахту гермообъема.

2.2. Анализ процессов, происходящих в гермозоне. Истечение теплоносителя в гермообъем приводит к резкому повышению давления во всех герметичных помещениях (рис. 2.3). На 10-й с от начала аварии давление в гермообъеме достигает величины уставки открытия ПК бокса ПГ-ГЦН (рис. 2.3). Их открытие приводит к сбросу пароводяной смеси из гермообъема в окружающую среду и, как следствие, к снижению давления в гермообъеме.

Как видно из рис. 2.3, процесс снижения давления зависит от выбранных граничных условий. В вариантах 2 и 4 давление в гермообъеме снижается быстрее, чем в остальных вариантах, так как в этих вариантах предполагается, что один из клапанов остается в открытом состоянии.

Эффективность работы спринклерной системы по снижению давления в гермообъеме наблюдается при сравнении результатов варианта 3 с остальными вариантами. Скорость снижения давления в гермообъеме в варианте 3 наименьшая, так как здесь изначально предполагалось, что спринклерная система неработоспособна, а все клапаны гермообъема работоспособны (рис. 2.3).

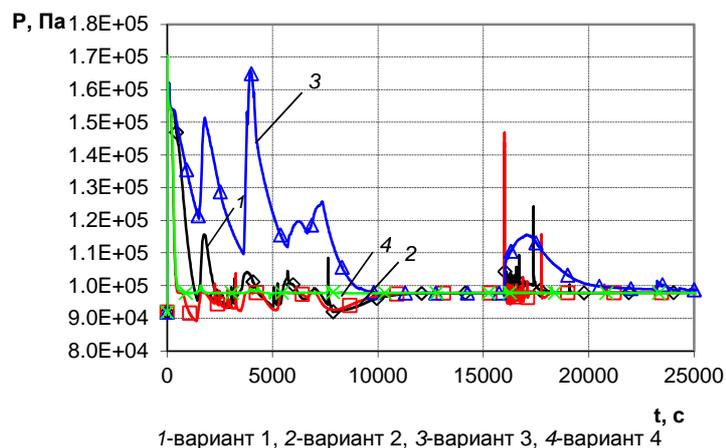


Рис. 2.3. Давление в гермообъеме

2.3. Вопросы, связанные с накоплением водорода и его возможным возгоранием. Через течь в гермообъем попадает водород, образовавшийся из-за окисления циркониевых оболочек твэлов. Накопление большого количества водорода $H_2 \geq 10\%$ в гермообъеме, при определенных концентрациях кислорода и пара ($O_2 \geq 5\%$, $H_2O \leq 55\%$), приводит к его возгоранию, при этом выход энергии приводит к повышению давления в гермообъеме (рис. 2.4). Во всех рассматриваемых вариантах концентрация водорода в гермообъеме достигает 10%, но только в вариантах 1 и 2 происходит возгорание водорода, так как только в этих вариантах имеется достаточная концентрация кислорода (рис. 2.5).

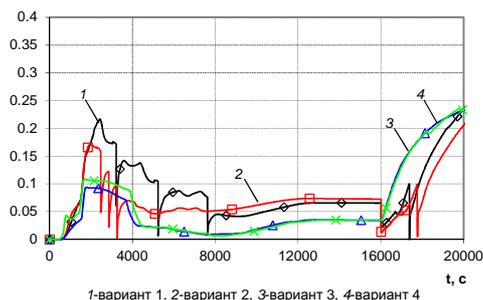


Рис. 2.4. Объемная фракция водорода в боксе ПГ-ГЦН

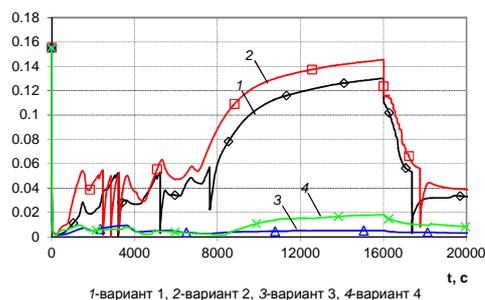


Рис. 2.5. Объемная фракция кислорода в боксе ПГ-ГЦН

Это объясняется тем, что в данных вариантах предполагалось, что спринклерная системы работоспособна, что приводит к конденсации пара и снижению давления в гермообъеме ниже атмосферного, и из-за существующей негерметичности гермообъема может возникнуть приток воздуха из атмосферы в гермообъем и накопление кислорода.

Возгорание водорода приводит к пикам давления в вариантах 1 и 2 на 3200, 5200, 7600 с, но давление в гермообъеме повышается незначительно из-за негерметичности гермообъема. Отсутствие возгорания в вариантах 3 и 4 объясняется отсутствием достаточного количества кислорода, что является следствием неработоспособности спринклерной системы и заполнения гермозоны паровой фазой.

2.4. Выход продуктов деления. На 638-й с от начала аварии температура оболочек твэлов в 14, 15 аксиальных сегментах достигает значения 900°C , что соответствует температуре, при которой начинается выход газообразных продуктов деления из оболочки (табл. 2.1).

После начала разрушения твэлов на 1600-й с начинается выход радионуклидов из топлива в первый контур как в газообразной, так и в аэрозольной формах. В вариантах 1 и

2, когда спринклерная система работоспособна, часть радиоактивных аэрозолей смывается спринклерной системой в бак Б-8/2, а также оседает на стенах гермообъема; в вариантах 3 и 4 - только незначительная часть остается в гермообъеме. После перемещения кориума в шахту гермообъема количество выхода радиоуклидов как в газообразной, так и в аэрозольной формах резко возрастает.

Таблица 2.1

Количество выброса в атмосферу продуктов деления				
Радионуклиды	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Xe,Kr	196.9	218.41	232.504	238.079
Cs,Rb	8.5422	18.465	77.2657	95.2404
Ba,Sr	1.5281	2.5047	11.509	11.9463
I,Br	1.12E-06	3.32E-06	0.000286	0.000287
Te,Se	1.3095	3.1933	12.8144	15.8652
Ru,Pd,Rh	0.000464	0.000523	0.002614	0.004645
Mo,Tc,Nb	1.1947	2.5335	8.64758	13.7039
Ce,Zr,Np	1.6682	0.95392	5.01291	3.42432
La,Pm,Y,Pr,Nd	0.10998	0.068035	0.341505	0.464338
As,Sb	0.009937	0.017073	0.067039	0.095895
Sn,Ag	0.071344	0.13684	0.46989	0.745039
CsI	1.4716	3.1657	13.3044	16.3281

При сравнении результатов выбросов радионуклидов видно, что в вариантах, где принято, что один из клапанов гермообъема остается открытым, количество радиоактивных аэрозолей в атмосфере увеличится в 1,6 раза, тогда как при отказе спринклерной системы выброс радиоактивных аэрозолей в атмосфере увеличится в 8,4 раза.

Выводы. Результаты анализа показали, что основной вклад в уменьшение количества выброса в атмосферу вносит работа спринклерной системы. Неработоспособность спринклерной системы приводит к восьмикратному увеличению величины выброса. Эффективность работы ПК гермообъема оценена сравнением вариантов с нормальной работой данного клапана и с отказом на закрытие одного из восьми клапанов. В вариантах, где рассматривался отказ на закрытие одного клапана гермообъема, наблюдается двукратное увеличение выброса. Результаты анализа также показали, что работоспособность спринклерной системы увеличивает вероятность возгорания водорода в гермообъеме, однако относительно большая негерметичность гермообъема приводит к незначительному повышению давления в течение процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants / IAEA 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG-12. – Vienna, 1999. – 105p.
2. Разработка руководства по управлению и оценке радиационных последствий запроектных аварий для энергоблока 2 Армянской АЭС / ВНИИАЭС. – М. – 1994. – 140с
3. **Gauntt R. O., Cole R. K., Erickson C. M.** et al //MELCOR Computer Code Manuals NUREG/CR-6119, SAND2000-2117/1. – May, 2000 .
4. MELCOR Computer Code Manuals. Vol.2: Reference Manuals. Version 1.8.5, NUREG/CR-6119, Vol.2, Rev.2. SAND2000 - 2117/2. – May, 2000.
5. Описание модели ААЭС блока N2 для кода MELCOR 1.8.5/ НТЦ ЯРБ. –Ер., 2005. –144 с .
6. База данных для MELCOR, разработанная для ААЭС блока N2/ НТЦ ЯРБ. –Ер., 2005. - 320 с

7. База данных изотопного состава ядерного топлива реактора ВВЭР-440/270 для моделирования тяжелых аварий посредством MELCOR/HTI-ЯРБ, № NRSC-INT-01-05-Ер., 2005. – 250 с.
8. Технический отчет о проведении испытания на плотность и герметичность системы герметичных помещений блока №2 ААЭС./ЗАО “Атомсервис”, ИП.ЭТД.31.РТУ-01. – Ер., 2008. – 20 с.

ГИУА(П). Материал поступил в редакцию 09.11.2009.

Ա.Մ. ԱՄԻՐՋԱՆՅԱՆ, Ա.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ

**ԱԷԿ-Ի ԱՌԱՋԻՆ ԿՈՆՏՈՒՐԻՑ ՋԵՐՄԱԿՐԻ ՉՓՈԽՉԱՏՈՒՑՎՈՂ ԱՐՏԱՀՈՍՔՈՎ
ՊԱՅՄԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ԾԱՆՐ ՎԹԱՐՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ ՑԱՅՏԱԶՐՄՈՒՂԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ
ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԱՐԳՏՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Հայկական ԱԷԿ-ի (ՋՋԷՌ-440 Վ-270 տեսակի ռեակտոր) օրինակով հետազոտվել է ճնշման փոխհատուցիչը առաջին կոնտուրի տաք խողովակագծին միացնող խողովակի պատովելու պատճառով առաջացած վթարի զարգացման ընթացքը, հաշվի առնելով ակտիվ գոտու վթարային հովացման համակարգի մերժումը, ինչպես նաև որոշվել է ցայտաջրմուղային համակարգի ազդեցությունը շրջակա միջավայր արտանետվող տրոհման արգասիքների քանակի և հերմետիկ տարածություններ ջրածնի պայթուցիկության կոնցենտրացիայի առաջացման վրա: Չնայած այդպիսի վթարի հավանականությունը կազմում է $\approx 10^{-7}$, անձնակազմի և բնակչության պաշտպանության պլանները կազմման համար անհրաժեշտ է նաև նման վթարների վերլուծությունը: Վերլուծության արդյունքները ցույց են տվել, որ ցայտաջրմուղային համակարգի աշխատանքը կարևոր նշանակություն ունի շրջակա միջավայր արտանետվող տրոհման արգասիքների քանակի նվազեցման համար: Այդ համակարգի անաշխատունակությունը հանգեցնում է արտանետումների ծավալի ութապատիկ աճի:

Առանցքային բառեր. ատոմային էլեկտրական կայանների անվտանգություն, ծանր արտանախագծային վթար, տրոհման արգասիքների արտանետումներ:

A.M. AMIRDJANYAN, A.A. GEVORGYAN, V.Z. MARUKHYAN

**ESTIMATION OF SPRAY SYSTEM EFFICIENCY IN CASE OF LOSS IN
COOLANT SEVERE ACCIDENT CONDITION**

The results of pressurize surge line double ended break accident analysis in case of failure of ECCS at Armenian NPP are presented. Based on the analysis results the assessment of spray system efficiency on decreasing confinement pressure and amount radioactive material is carried out. Hydrogen behavior in confinement is analyzed. The occurrence of conditions for possible hydrogen burning in the confinement is assessed as well. Likelihood of accident is in the range of 10^{-7} . However for accident analysis purposes of such kind of accidents needs to be taken into account. The analysis shows that the main contributor in release decrease is spray system availability factor. Unavailability of spray system could lead to the increase of radioactive release by factor 8.

Keywords: safety of NPP, severe accidents, radioactive release.

Т.С. ТАТИКЯН, К.С. МИНАСЯН

УЧЕТ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ВЫБОРЕ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН ТЭС И АЭС

Рассматриваются факторы воздействия систем охлаждения паровых турбин ТЭС и АЭС на окружающую среду. Приведена методика учета экологических факторов при выборе систем охлаждения паровых турбин. Представлены результаты ориентировочного расчета составляющих себестоимости электроэнергии, связанных с системами охлаждения с испарительными, "сухими" и комбинированными охладителями, с учетом затрат на компенсацию их вредного экологического воздействия.

Ключевые слова: система охлаждения, окружающая среда, эксплуатационные затраты, экологические факторы.

Для охлаждения паровых турбин ТЭС и АЭС в зависимости от местных условий и поставленных задач применяются системы охлаждения, существенно отличающиеся по показателям капитальных затрат, охлаждающей способности, эксплуатационных затрат и экологического воздействия на окружающую среду [1-3]. К числу этих систем относятся:

- прямоточные системы технического водоснабжения;
- системы с охлаждением воды в прудах-охладителях;
- оборотные системы охлаждения с испарительными градирнями и брызгальными бассейнами;
- оборотные системы охлаждения с "сухими" охладителями циркуляционной воды;
- оборотные системы с комбинированными охладителями, включающими базисные "сухие" охладители и пиковые испарительные охладители.

Для каждой из перечисленных систем охлаждения, отличающихся по способу передачи тепла в окружающую среду, возможно варьирование расходом циркуляционной воды, поверхностью охлаждения и размерами охладителей воды конденсаторов турбин, применением поверхностных или смешивающих конденсаторов [4,5].

В зависимости от месторасположения электростанции и применяемой системы охлаждения существенно отличаются затраты на обеспечение экологической безопасности системы охлаждения турбины ($Z_{\text{ЭКОЛ}}$), связанные со следующими факторами;

- величина забора свежей воды от природы;
- нагрев возвратной воды;
- увеличение примесей в возвратной воде;

- потери воды из-за испарения, фильтрации и уноса;
- создание шума, смога и гололеда в районе испарительных градирен и брызгальных бассейнов;
- обработка циркуляционной воды химреагентами.

Со временем, в связи с ужесточением экологических требований, затраты на обеспечение экологической безопасности систем охлаждения электростанций увеличатся более стремительно, чем стоимость расходуемого топлива и “сухих” охладителей. Поэтому растет актуальность учета экологических факторов при выборе систем охлаждения паровых турбин ТЭС и АЭС.

Для приведения различных систем охлаждения к сравнимым условиям по эффективности затрат предлагается нижеследующая методика.

1. По сроку службы основного оборудования электростанции оцениваются необходимый срок службы системы охлаждения и отпуск электроэнергии ($\mathcal{E}_{от}$) за срок службы.
2. Исходя из мощности электростанции, обеспеченности региона водными ресурсами, климатических условий, расчетного давления отработавшего пара турбин в конденсаторе (P_k), формируются приемлемые варианты системы охлаждения.
3. Рассчитываются приведенные затраты ($\mathcal{Z}_{охл}$) для каждого варианта за весь срок службы в целом на систему охлаждения и составляющие себестоимости 1 кВт·ч отпущенной электроэнергии ($C_{охл}$).

Эти расчеты выполняются для нескольких значений средневзвешенного давления отработавшего пара в конденсаторе турбины (P_k) в рабочей зоне $P_{kмин} \leq P_k \leq P_{kмакс}$.

Затраты на систему охлаждения определяются по формуле

$$\mathcal{Z}_{охл} = \mathcal{Z}_{охл}^{кап} + \mathcal{Z}_{охл}^{эксп} + \mathcal{Z}_{охл}^{топ} + \mathcal{Z}_{охл}^{экол} + \mathcal{Z}_{охл}^{зам}, \quad (1)$$

где $\mathcal{Z}_{охл}^{кап}$ – капитальные вложения в систему охлаждения, приведенные к единому (базовому) году посредством их дисконтирования; $\mathcal{Z}_{охл}^{эксп}$ – затраты на эксплуатацию системы охлаждения, в том числе на текущие ремонты, электроэнергию на собственные нужды, обслуживающий персонал и т.п.; $\mathcal{Z}_{охл}^{топ}$ – прирост затрат на топливо из-за отклонения давления отработавшего пара в конденсаторе от расчетного; $\mathcal{Z}_{охл}^{экол}$ – затраты на компенсацию или предотвращение вредного экологического воздействия системы охлаждения, включая плату за водопользование, сбросы вредных веществ со сточными водами, штрафы и т.п.; $\mathcal{Z}_{охл}^{зам}$ – прирост затрат при получении электроэнергии от замещающей электростанции в периоды ограничения мощности из-за недостаточного охлаждения паровых турбин.

Приводя затраты, представленные в выражении (1), к 1 кВт·ч отпущенной электроэнергии, определяются составляющие затрат в себестоимости электроэнергии, связанные с системой охлаждения, и отдельные слагаемые:

$$C_{\text{ОХЛ}} = Z_{\text{ОХЛ}} / \partial_{\text{ОТ}}, \quad C_{\text{ТОП}} = Z_{\text{ТОП}} / \partial_{\text{ОТ}},$$

$$C_{\text{КАП}} = Z_{\text{КАП}} / \partial_{\text{ОТ}}, \quad C_{\text{КОЛ}} = Z_{\text{КОЛ}} / \partial_{\text{ОТ}},$$

$$C_{\text{ЭКСП}} = Z_{\text{ЭКСП}} / \partial_{\text{ОТ}}, \quad C_{\text{ЗАМ}} = Z_{\text{ЗАМ}} / \partial_{\text{ОТ}}.$$

По минимальной составляющей $C_{\text{ОХЛ}}$ выбирается система охлаждения, определяются оптимальное давление отработавшего пара в конденсаторе турбины и оптимальные капитальные затраты в систему охлаждения.

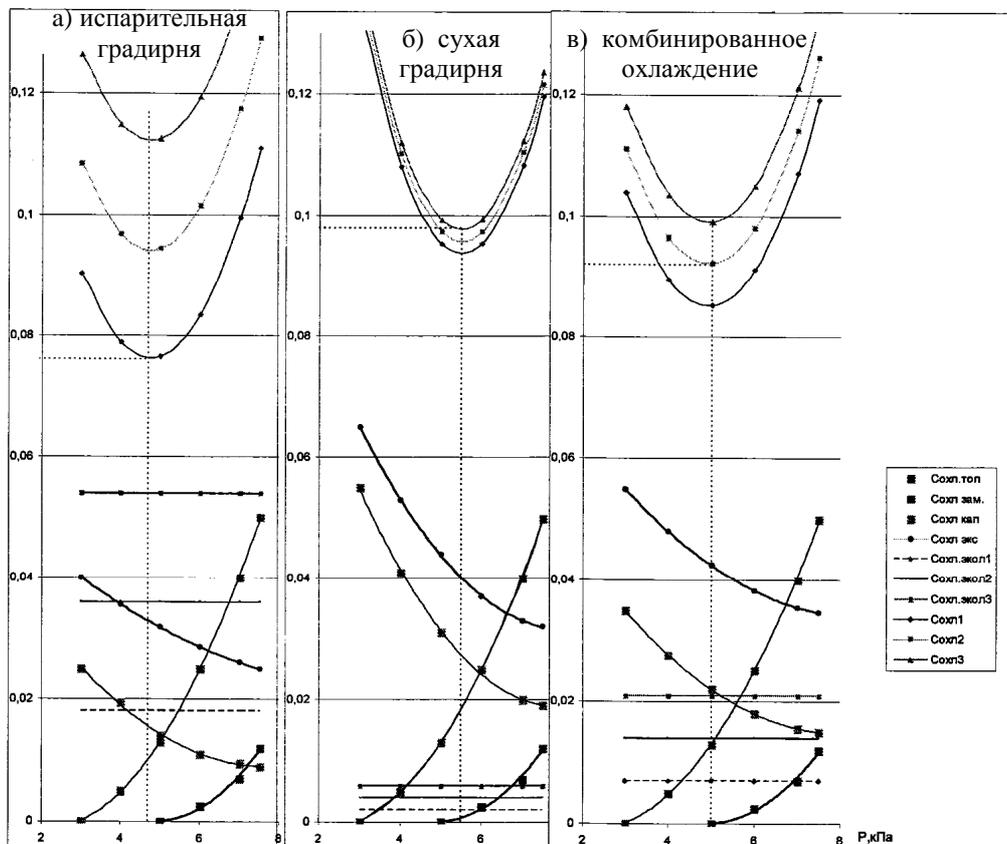


Рис. Затраты, связанные с системой охлаждения

В качестве примера на рисунке приведено графическое представление результатов расчетов себестоимости охлаждения, выполненных по ориентировочным данным затрат, для паротурбинной установки мощностью 300 МВт в маловодном районе. При этом рассматриваются три варианта системы охлаждения: с испарительной градирней; с радиаторно-охладительной башней и смешивающим

конденсатором ("сухая" система охлаждения типа Геллера); с радиаторно-охладительной башней и дополнительным пиковым испарительным охладителем (комбинированная система).

Для каждого варианта системы охлаждения экологические затраты $Z_{\text{экол}}$ и суммарные затраты $Z_{\text{охл}}$ рассчитаны при существующих расценках экологических платежей (индекс 1), а также при двукратном и трехкратном увеличении этих расценок (индексы соответственно 2 и 3).

По представленным данным, при существующих расценках экологических платежей, наименьшие составляющие затрат на систему охлаждения в себестоимости электроэнергии имеют место при испарительной градирне, $C_{\text{охл}} = 0,076 \text{ руб/кВт/ч}$ и давлении в конденсаторе $4,6 \text{ кПа}$.

При двукратном увеличении расценок экологических платежей наименьшие составляющие затрат на систему охлаждения в себестоимости электроэнергии имеют место при комбинированной системе охлаждения, $C_{\text{охл}} = 0,091 \text{ руб/кВт/ч}$ и давлении в конденсаторе $5,0 \text{ кПа}$.

При трехкратном увеличении расценок экологических платежей наименьшие составляющие затрат на систему охлаждения в себестоимости электроэнергии имеют место при "сухой" системе охлаждения, $C_{\text{охл}} = 0,098 \text{ руб/кВт/ч}$ и давлении в конденсаторе $5,6 \text{ кПа}$.

Выводы.

1. В условиях опережающего повышения расценок экологических платежей, по сравнению с капитальными затратами, для маловодных районов со временем станут предпочтительными "сухие" и комбинированные системы охлаждения паровых турбин ТЭС и АЭС.
2. При применении "сухих" и комбинированных систем охлаждения оптимальное давление в конденсаторе турбины выше, чем при испарительном охлаждении.
3. Представленная методика позволяет осуществить выбор системы охлаждения паровых турбин с учетом экологических факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гончаров В.В.** Брызгальные водоохладители ТЭС и АЭС. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 140 с.
2. **Решетин В.Н.** Сухое охлаждение паровых турбин // Энергетик. – 1998. – № 3. – С. 19-20.
3. Методические указания по оценке влияния гидротехнических сооружений на окружающую среду. РД 153-34.2-02.409-2003.-М.: РАО "ЕЭС России", 2003.

4. **Борисов Г.М., Скубиенко С.В.** Влияние метода определения оптимального расхода охлаждающей воды и экономического вакуума на себестоимость электроэнергии ТЭС // Электрические станции. – 2006. - №1. - С. 2-5.
5. Методика разработки норм и нормативов водопотребления и водоотведения на предприятиях теплоэнергетики (МТ 34-00-030-87). РД 34.02.401.-М.: Минэнерго, 1998.

ГИУА (П), ЮРГТУ (НПИ). Материал поступил в редакцию 10.05.2010.

S.U. ԹԱԹԻԿՅԱՆ, Կ.Ս. ՄԻՆԱՍՅԱՆ

**ԲՆԱՊԱՀՊԱՆԱԿԱՆ ԳՈՐԾՈՆՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՈՒՄԸ
ՋԷԿ-ԵՐԻ և ԱԷԿ-ԵՐԻ ՇՈԳԵՏՈՒՐԲԻՆՆԵՐԻ ՀՈՎԱՑՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ**

Դիտարկվում են ՋԷԿ-երի և ԱԷԿ-երի շոգետուրբինների հովացման համակարգերի շրջակա միջավայրի վրա ազդեցության գործոնները: Բերված է շոգետուրբինների հովացման համակարգերի ընտրության ժամանակ բնապահպանական գործոնների հաշվառման մեթոդ: Ներկայացված են «թաց», «չոր» և համակցված հովացման համակարգերի համար էլեկտրաէներգիայի ինքնարժեքի բաղադրիչների կողմնորոշիչ հաշվարկները՝ բնապահպանական բացասական ազդեցության փոխհատուցման ծախսերի հաշվառմամբ:

Առանցքային բառեր. հովացման համակարգ, շրջակա միջավայր, շահագործման ծախսեր, բնապահպանական գործոններ:

T.S. TATIKYAN, K.S. MINASYAN

**ENVIRONMENTAL FACTORS ACCOUNTING DURING TPP's AND NPP's
STEAM TURBINE COOLING SYSTEM SELECTION**

The environmental impact factors of TPP's and NPP's steam turbine cooling systems are considered. The method of environmental factors accounting during steam turbine cooling systems selection is given. The approximate calculation results of electricity cost generating components related with the cooling systems of "dry", "wet" and "combined" types considering compensation costs of negative environmental impacts is introduced.

Keywords: cooling system, environment, operational expenses, ecological factors.

Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Գ.Հ. ԳԱԼՍՏՅԱՆ

**ՄԻՆՔՐՈՆ ՄԵՔԵՆԱՅԻ ԱՆՑՈՒՄԱՅԻՆ ՊՐՈՑԵՍԻ
ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՍՈՂԵԼԸ ԲՆԱԿԱՆ ՏԵՍՔՈՎ**

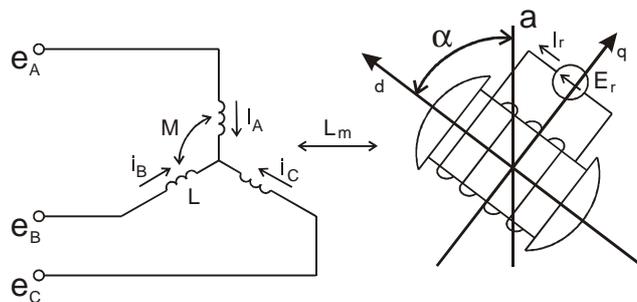
Դիտարկված է սինքրոն մեքենայի անցումային պրոցեսների մաթեմատիկական մոդելը՝ բնական տեսքով: Բերված են բնական տեսքով մաթեմատիկական մոդելի փորձարկման արդյունքները՝ արտաքին մեխանիկական մոմենտի փոփոխության դեպքում:

Առանցքային բառեր. անցումային պրոցես, մաթեմատիկական մոդել, սինքրոն մեքենա, ստատոր, ռոտոր, էլեկտրամագնիսական մոմենտ, դեմպֆերային փաթույթ:

Մինքրոն մեքենայի (ՄՄ) ստացիոնար և անցումային պրոցեսներին վերաբերող գրականության մեջ [1-4] բերված են վերջինիս անցումային պրոցեսների մաթեմատիկական մոդելները՝ d, q տեսքով (Պարկ-Գորնի ձևափոխությունները):

Նշենք, որ եթե ՄՄ-ի ստատորի լարումը ոչ սիմետրիկ է, ապա նրա ընդհանրացված վեկտորի մոդուլի մեծությունը և պտտման արագությունը ժամանակի ֆունկցիա են և d, q տեսքով հավասարումներում ստեղծում են դժվարություններ [3]: Լարման ուղիղ և հակադարձ բաղադրիչների առկայության դեպքում վերադրման եղանակի կիրառումն անթույլատրելի է d, q տիպի հավասարումներում՝ վերջինիս ոչ գծայնության պատճառով:

Դիտարկենք սինքրոն մեքենայի (նկ.1) էլեկտրամագնիսական անցումային պրոցեսի հավասարումները՝ ընդունելով, որ $e_A + e_B + e_C = 0$:



Նկ. 1. ՄՄ-ի սխեմատիկ պատկերումը

Ստատորի և ռոտորի փաթույթներում լարումները կորոշվեն հետևյալ առըն-չություններով [2].

$$\begin{cases} u_S = R_S i_S + \frac{d\psi_S}{dt} \\ -E_r = r_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} \end{cases} \quad s = a, b, c, \quad (1)$$

որտեղ u_S –ը ստատորի ակնթարթային լարումն է, $R(r)$ –ը՝ ստատորի (ռոտորի) փաթույթի ակտիվ դիմադրությունները, $i_S(i_r)$ –ն՝ ստատորի (ռոտորի) փաթույթների հոսանքները, $\psi_S(\psi_r)$ –ը՝ ստատորի (ռոտորի) փաթույթների հոսքակցումները, E_r –ը՝ ռոտորի փաթույթին կիրառված հաստատուն էլշու –ն:

Կազմենք հավասարումներ Կիրիսիուֆի I օրենքով.

$$\begin{cases} i_A + i_B + i_C = 0 \\ \psi_A + \psi_B + \psi_C = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Փաթույթների հոսքակցումները հոսանքների միջոցով կարտահայտվեն հետևյալ տեսքով [1].

$$\begin{cases} \psi_A = (L-M)i_A + L_m i_r \cos\alpha \\ \psi_B = (L-M)i_B + L_m i_r \cos(\alpha-120) \\ \psi_C = (L-M)i_C + L_m i_r \cos(\alpha+120) \\ \psi_r = l_r + L_m [i_A \cos\alpha + i_B \cos(\alpha-120) + i_C \cos(\alpha+120)] \end{cases} \quad (3)$$

որտեղ $L(l)$ –ն ստատորի (ռոտորի) փաթույթի ինդուկտիվությունն է, M –ը՝ ստատորի փաթույթների փոխինդուկտիվությունը, L_m –ը՝ ստատորի և ռոտորի փաթույթների զուգահեռ դիրքում փոխինդուկտիվությունը, α –ն՝ ստատորի a ֆազի փաթույթի և ռոտորի փաթույթի կազմած անկյունը:

Հաշվի առնելով (2) –ը՝ (3) –ում արտաքսելով ψ_C –ն, i_C –ն կստանանք.

$$\begin{cases} \psi_A = (L-M)i_A + L_m i_r \cos\alpha \\ \psi_B = (L-M)i_B + L_m i_r \cos(\alpha-120) \\ \psi_r = l_r + \sqrt{3}L_m \sin(\alpha+60)i_A + \sqrt{3}L_m i_B \sin\alpha \end{cases} \quad (4)$$

(4) հավասարումների համակարգը ներկայացնենք մատրիցային տեսքով.

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L-M & 0 & L_m \cos\alpha \\ 0 & L-M & L_m \cos(\alpha-120) \\ \sqrt{3}L_m \sin(\alpha+60) & \sqrt{3}L_m \sin\alpha & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

կամ

$$\Psi = A \cdot i :$$

Նշենք, որ A մատրիցի որոշիչը՝ $\Delta = (L-M) \left[1(L-M) - \frac{3}{2}L_m^2 \right]$ և հաստատուն մեծություն է:

Լուծելով (5) մատրիցի համակարգը հոսանքի վեկտորի նկատմամբ՝ կստանանք. $i = A^{-1} \cdot \Psi$: (6)

(1) –ը գրելով մատրիցային տեսքով, կստանանք.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_r \end{bmatrix}, \quad (7)$$

կամ $\frac{d}{dt} \Psi = -R \cdot i + e :$

(7) –ում հոսանքների փոխարեն տեղադրելով (6) –ը՝ կստանանք

$$\frac{d}{dt} \Psi = -R \cdot A^{-1} \cdot \Psi + e, \quad (8)$$

իսկ (8) համակարգը համալրելով Դալամբերի հավասարումով [3]՝

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{t1} - M_{տղխ} , \quad (9)$$

որտեղ $M_{t1} = -i_r L_m [i_A \sin \alpha + i_B \sin(\alpha - 120) + i_C \sin(\alpha + 120)]$,

կստանանք ՄՄ –ի անցումային պրոցեսի լրիվ մաթեմատիկական մոդելը՝ բնական տեսքով: Այն առաջին կարգի ոչ գծային դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգ է, որը կարելի է լուծել միայն իտերացիոն եղանակներով:

Ներկայացված ՄՄ –ի անցումային պրոցեսների մաթեմատիկական մոդելի հիման վրա մշակվել է համակարգչային ծրագիր, որը թույլ է տալիս կատարել հետևյալ փորձարկումները.

ա) անցումային պրոցեսի հաշվարկ ցանկացած սկզբնական կետից,

բ) ստանալ ՄՄ –ի մեխանիկական և անկյունային բնութագրերը ($M = f(S)$, $M = f(\theta)$),

գ) տրված կոնստրուկտիվ պարամետրերի և արտաքին գրգիռների (ցանցի լարումը, գրգռման լարումը, ռոտորի լիսեռի վրա կիրառված մեխանիկական մոմենտը) դեպքում ստանալ ՄՄ –ի ստացիոնար կետը,

դ) հետազոտել ստացիոնար կետի կայունությունը,

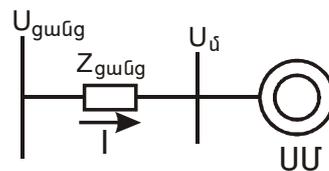
ե) թողարկում (գրգռման փաթույթը փակված համապատասխան դիմադրությամբ առանց հանդարտիչ փաթույթների կամ դրանց առկայությամբ),

զ) տարբեր օրենքներով փոփոխվող մեխանիկական մոմենտի դեպքում ստանալ ստատորի լարման և հոսանքի, սահքի, θ անկյան, համագոր մոմենտի և այլն փոփոխման գրաֆիկները:

Ստորև ներկայացված են հաշվարկի մի քանի օրինակներ, որոնք բնութագրում են ցանցի հանգույցներում էլեկտրաէներգիայի որակի վրա ՄՄ –ի ունեցած ազդեցությունը: Դիտարկվող օրինակներում համարում ենք, որ ՄՄ –ն միացված է 6,3 կՎ լարմամբ և անվերջ հզորությամբ դողին՝ $Z_{ցանց}$ դիմադրությամբ (նկ. 2)

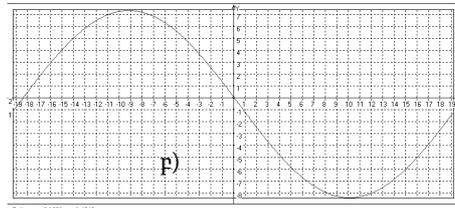
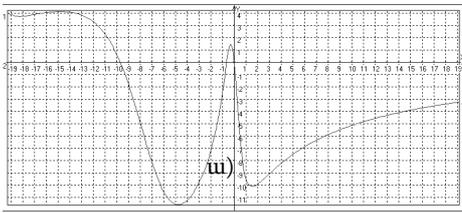
Մոդելում ներկայացված է իրական՝ ոչ բացահայտ բևեռներով և առանց կարգավորիչների ՄՄ, որի անձնագրային տվյալներն են.

- | | |
|------------------------------|--|
| $P_{ան} = 8 \text{ ՄՎտ},$ | $R = 0,307 \text{ Օհմ},$ |
| $U_{ան} = 6 \text{ կՎ},$ | $r = 4,5 \text{ Օհմ},$ |
| $n = 3000 \text{ պտ/ր},$ | $L - M = 0,013 \text{ Հն},$ |
| $\theta_{ան} = 40^\circ,$ | $L_m = 0,176 \text{ Հն},$ |
| $\cos \Phi = 0,9,$ | $T_j = 10,44 \text{ վրկ},$ |
| $M_{ան} = 24 \text{ կՆմ},$ | $J = 500 \text{ կգ} \cdot \text{ւ}^2:$ |
| $M_{մաքս} = 35 \text{ կՆմ},$ | |



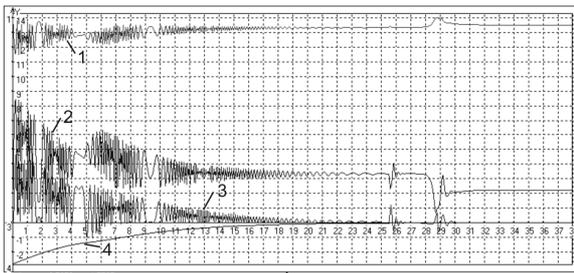
Նկ.2

Նկ. 3 –ում ներկայացված են՝ ա) սինքրոն մեքենայի ասինքրոն մոմենտի սահքից կախվածության՝ $M_{սս} = f(s)$ և բ) սինքրոն մեքենայի սինքրոն մոմենտի θ անկյունից կախվածության՝ $M_u = f(\theta)$ կորերը:

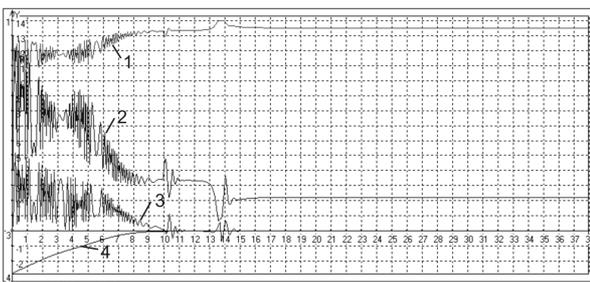


Նկ.3. ա) ՄՄ –ի սինքրոն մոմենտի կախվածությունը սահքից՝ $M_{uu} = f(s)$,
 բ) ՄՄ –ի սինքրոն մոմենտի կախվածությունը θ անկյունից՝ $M_u = f(\theta)$

Ստորև ներկայացված են առանց դեմպֆերային և դեմպֆերային փաթույթներով ՄՄ – ների թողարկման անցումային պրոցեսը նկարագրող կորերը (նկ.4 ա,բ): Թողարկումը կատարվել է հետևյալ կերպ. մինչ ցանցին միացնելը հանում ենք արտաքին մեխանիկական մոմենտը, անջատում ենք մեքենայի գրգռման լարումը, ռոտորը փակում ենք մարեցնող դիմադրությամբ (տվյալ դեպքում՝ 500 Ohm (այդ դեպքում ՄՄ –ի $M_{uu} = f(s)$ կախվածության կորը կնդունի նկ. 5 –ում պատկերված տեսքը)), նոր միայն մեքենան միացնում ենք ցանցին: Երբ ՄՄ –ի ռոտորի արագությունը հասնում է սինքրոն արագությանը մոտ արագության, հանում ենք մարեցնող դիմադրությունը և միացնում գրգռման լարումը, որի շնորհիվ մեքենան ներքաշվում է սինքրոն ռեժիմ և, երբ սահքը հավասարվում է գրոյի, միացնում ենք արտաքին մեխանիկական մոմենտը: Ընդ որում՝ $U_{ցանց} = 6,3$ կՎ, $Z_{ցանց} = 0,2277 + j0,2277$, $M_{մեխ} = 24,05$ կՆմ:



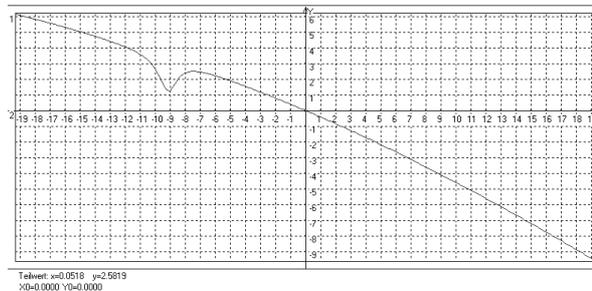
ա)



բ)

Նկ.4. ա) Առանց դեմպֆերային փաթույթներով ՄՄ –ի թողարկումը
 բ) Դեմպֆերային փաթույթներով ՄՄ –ի թողարկումը

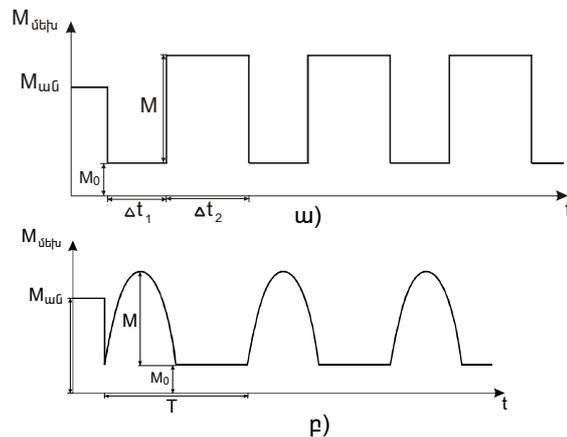
Նկ.4 –ում բերված են ՄՄ –ի ստատորի լարման մոդուլի (1), հոսանքի մոդուլի (2), ռոտորին ազդող համագոր մոմենտի (3) և սահքի (4) կորերը՝ կախված ժամանակից: Նշված ֆիզիկական մեծությունների իրական արժեքները ստանալու համար անհրաժեշտ է գրաֆիկի կետերի համապատասխան օրդինատները բազմապատկել համապատասխանաբար 4, 4, 0,3 և 5 թվերով:



Նկ.5. ՄՄ –ի ասինքրոն մոմենտի կախվածությունը սահքից՝ $M_{\text{աս}} = f(s)$, երբ ռոտորը փակված է $r = 500 \text{ Ohm}$ դիմադրությամբ

Առանց դեմպֆերային փաթայթներով ՄՄ –ի թողարկման ընդհանուր տևողությունը տևում է 22,7 վրկ, ընդ որում՝ թողարկման սկզբում ՄՄ –ի ստատորի սեղմակներին լարման անկման առավելագույն արժեքը 1,13 կՎ է կամ անվանական լարման 18,83% –ը, ստատորի հոսանքի առավելագույն արժեքը 4,5 կԱ կամ 4,5 $I_{\text{ան ս}}$ է: Ի տարբերություն առանց դեմպֆերային փաթայթների ՄՄ–ի, դեմպֆերային փաթայթներով ՄՄ –ի թողարկման ընդհանուր ժամանակը կազմում է 10,8 վրկ, թողարկման սկզբում ստատորի սեղմակներին լարման անկման առավելագույն արժեքը 1,65 կՎ է կամ ՄՄ –ի անվանական լարման 27,5% –ը, իսկ ստատորի հոսանքի առավելագույն արժեքը 6,1 կԱ կամ 6,5 $I_{\text{ան ս}}$ է:

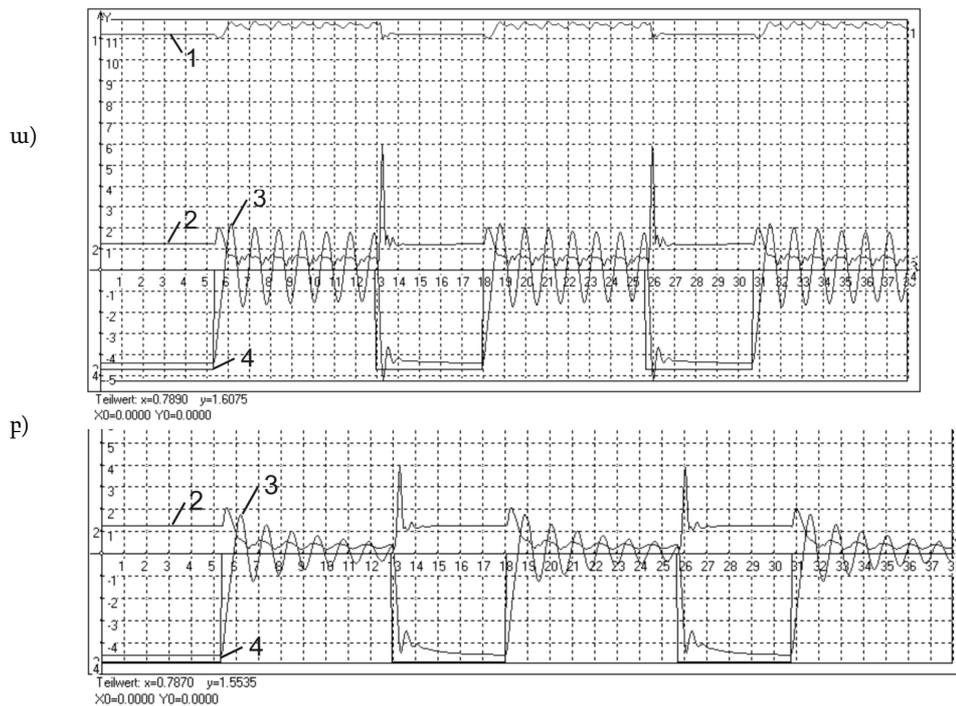
Հետագոտենք այն պրոցեսները, երբ ՄՄ–ի լիսեռին կիրառված արտաքին մեխանիկական մոմենտը փոփոխական է և ունի նկ.6 –ում պատկերված տեսքը:



Նկ. 6. Արտաքին մեխանիկական մոմենտի փոփոխման կորերը

Համարենք, որ նախնական վիճակում մեքենան աշխատում է անվանական հաստատուն արտաքին մեխանիկական մոմենտով՝ կայունացված ռեժիմում ($U_{գանց} = 6,3$ կՎ, $Z_{գանց} = 0,2277 + j0,2277$, $U_{ս} = U_{ան} = 6$ կՎ, $I = I_{ան} = 0,98$ կԱ, $M_{մեխ} = 24$ կՆմ, $S = 0$, $\theta = \theta_{ան} = -40,5^{\circ}$ (շարժիչային ռեժիմ)): Դիտարկենք այն դեպքը, երբ նկ.6ա –ում $\Delta t_1 = 6$ վրկ, $\Delta t_2 = 4$ վրկ, $M = M_{ան}$, $M_0 = 0$, նկ.6բ –ում $T = 4$ վրկ, $M = M_{ան}$:

Ստորև բերված են համապատասխանաբար առանց դեմպֆերային փաթույթների ՍՄ –ի և դեմպֆերային փաթույթներով ՍՄ –ի սեղմակների լարման, ստատորի հոսանքի θ անկյան և $M_{մեխ}$ –ի փոփոխման կորերը արտաքին մեխանիկական մոմենտի փոփոխման առաջին (նկ.6ա) տարբերակի համար (նկ. 7 ա,բ):



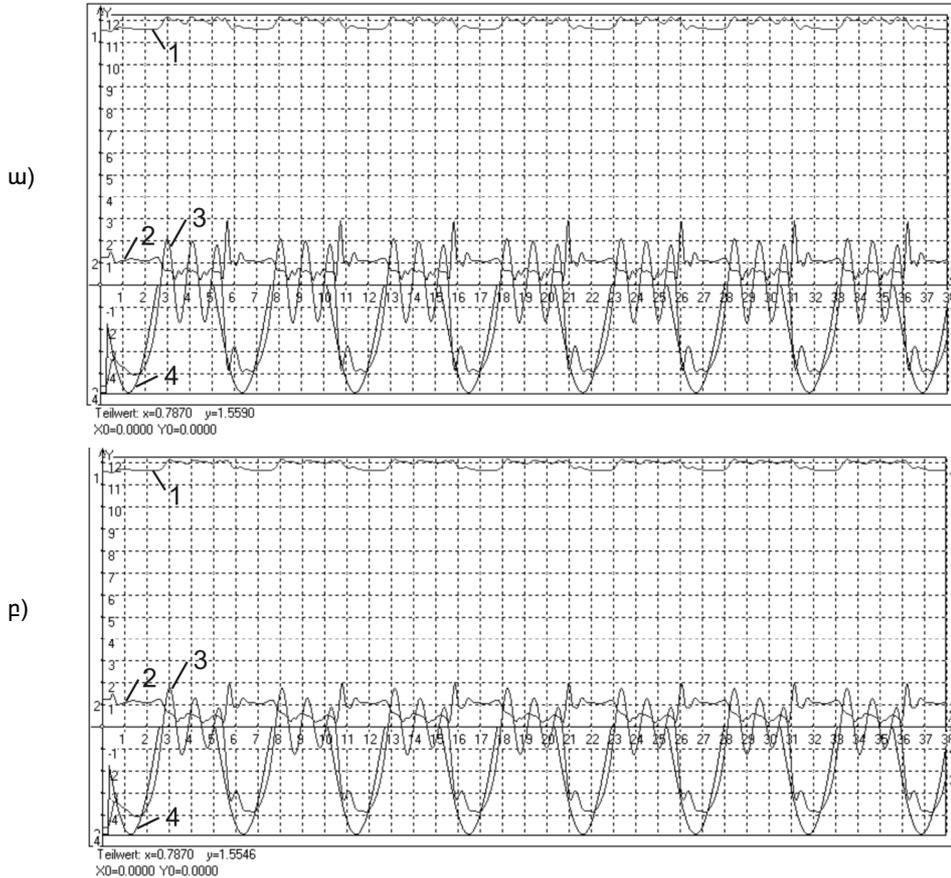
Նկ.7. ա) Առանց դեմպֆերային փաթույթների ՍՄ –ի աշխատանքը փոփոխական արտաքին մեխանիկական մոմենտով,
 բ) Դեմպֆերային փաթույթներով ՍՄ –ի աշխատանքը փոփոխական արտաքին մեխանիկական մոմենտով

Ինչպես երևում է գրաֆիկներից, արտաքին մեխանիկական մոմենտի փոփոխման առաջին դեպքում (նկ.6ա) առանց դեմպֆերային փաթույթներով ՍՄ –ի և դեմպֆերային փաթույթներով ՍՄ –ի սեղմակների լարման, ստատորի հոսանքի և θ անկյան տատանումները կլինեն համապատասխանաբար.

$$\Delta U_{ս} = 0,476 \text{ կՎ կամ } 8 \%, \Delta I = 4,6 \text{ կԱ կամ } 470 \%, \Delta \theta = 68^{\circ} \text{ և}$$

$$\Delta U_{ս \text{ դեմֆ}} = 0,37 \text{ կՎ կամ } 6.2 \%, \Delta I_{դեմֆ} = 2.9 \text{ կԱ կամ } 300 \%, \Delta \theta_{դեմֆ} = 56^{\circ}:$$

Այժմ կատարենք նույն փորձը՝ արտաքին մեխանիկական մոմենտի փոփոխման երկրորդ (նկ. 6բ) տարբերակի համար (նկ.8ա,բ):



Նկ.8. ա) Առանց դեմֆերային փաթույթների ՄՄ –ի աշխատանքը փոփոխական արտաքին մեխանիկական մոմենտով,
 բ) Դեմֆերային փաթույթներով ՄՄ –ի աշխատանքը փոփոխական արտաքին մեխանիկական մոմենտով

Նկ. 7 –ում և 8 –ում կորերը համարակալված են հետևյալ կերպ. 1 – ստատորի լարումը, 2 – ստատորի հոսանքը, 3 – θ անկյունը, 4 – արտաքին մեխանիկական մոմենտը: Նշված ֆիզիկական մեծությունների իրական արժեքները ստանալու համար անհրաժեշտ է գրաֆիկի կետերի համապատասխան օրդինատները բազմապատկել համապատասխանաբար 3, 2, 10 և 1 թվերով:

Ինչպես երևում է գրաֆիկներից, արտաքին մեխանիկական մոմենտի փոփոխման երկրորդ դեպքում (նկ.6բ) առանց դեմֆերային փաթույթներով ՄՄ –ի և դեմֆերային փաթույթներով ՄՄ –ի սեղմակների լարման, ստատորի հոսանքի և θ անկյան տատանումները համապատասխանաբար կլինեն

$\Delta U_{\text{մ}} = 0,286$ կՎ կամ $4,8\%$, $\Delta I = 2,1$ կԱ կամ 220% , $\Delta \theta = 53,5^\circ$ և

$\Delta U_{\text{մ դեմֆ}} = 0,256$ կՎ կամ $4,3\%$, $\Delta I_{\text{դեմֆ}} = 1,4$ կԱ կամ 150% , $\Delta \theta_{\text{դեմֆ}} = 41^\circ$:

Համենատեղով ստացված արդյունքները՝ տեսնում ենք, որ միևնույն արտաքին մեխանիկական մոմենտի դեպքում դեմաֆերային փաթույթներով ՄՄ –ի սեղմակների լարման, ստատորի հոսանքի և θ անկյան տատանումներն ավելի փոքր են, քան այդ նույն մեծությունների տատանումներն առանց դեմաֆերային փաթույթների ՄՄ –ի մոտ: Այսպիսով, դեմաֆերային փաթույթների առկայությունը ոչ միայն արագացնում է ՄՄ –ի թողարկումը, այլ նաև նվազեցնում է վերը նշված մեծությունների տատանումները և նպաստում դրանց արագ մարմանը:

Այսպիսով, փոփոխական արտաքին մեխանիկական մոմենտով աշխատող ՄՄ –ն և ԱՄ –ն անընդհատ գտնվում են անցումային պրոցեսում՝ ցանցի հանգույցներում և ճյուղերում ստեղծելով լարման և հոսանքի մոդուլների անցանկալի տատանումներ: Էլեկտրաէներգիայի որակի գնահատման համար անհրաժեշտ է ցանցի ռեժիմի հաշվարկային մոդելում ընդգրկել ՄՄ–ի և ԱՄ–ի էլեկտրամագնիսական և էլեկտրամեխանիկական անցումային պրոցեսները նկարագրող հավասարումներ և հաշվարկը կատարել համալիր մոդելով:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Горев А.А.** Переходные процессы синхронной машины. – Л.: Наука, 1985. – 502с.
2. **Ковач К.П., Рац, И.** Переходные процессы в машинах переменного тока. – М., 1963. – 744с.
3. **Важнов А.И.** Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256с.
4. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327с.

«Էներգետիկայի ԳՀԻ» ՓԲԸ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 13.04.2010.

В.С. САФАРЯН, Г.Г. ГАЛСТЯН

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА СИНХРОННОЙ
МАШИНЫ В НАТУРАЛЬНОМ ВИДЕ**

Рассмотрена математическая модель переходного процесса синхронной машины в натуральном виде. Приведены результаты экспериментирования математической модели синхронной машины в натуральном виде при изменении внешнего механического момента.

Ключевые слова: переходный процесс, математическая модель, синхронная машина, статор, ротор, электромагнитный момент, демпферная обмотка.

V.S. SAFARYAN, G.H. GALSTYAN

**MATHEMATICAL MODEL OF TRANSIENT PROCESS OF THE SYNCHRONOUS
MACHINE IN A NATURAL KIND**

The mathematical model of synchronous machine transient process in a natural form is introduced. The results of experimenting the mathematical model of the synchronous machine at variable external mechanical torque are given.

Keywords: transient process, mathematical model, synchronous machine, stator, rotor, electromagnetic torque, damper winding.

**Վ.Շ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Դ.Լ. ՄԻՐԶՈՅԱՆ, Ա.Ն. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ա.Գ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ,
Դ.Խ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Է.Ն. ՍՈՒՍԱՅԵԼՅԱՆ**

ՍՕԿ ՏՐԱՆՁԻՍՏՈՐՆԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՄԲ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՇԵՂՈՒՄՆԵՐԻ ԳՐԱՆՑՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿ

Ժամանակակից ինտեգրալ սխեմաներում (ԻՍ) կիսահաղորդչային տեխնոլոգիական գործընթացների անկատարելությունն առաջացնում է տարրերի, այդ թվում նաև տրանզիստորների պարամետրերի շեղումներ, որոնք բացասաբար են անդրադառնում ԻՍ-երի հուսալիության վրա: Այդ պատճառով ԻՍ-երի նախագծման արդի խնդիրներից է տեխնոլոգիական շեղումների առկայության պայմաններում հուսալիության ու ֆունկցիոնալ հնարավորությունների ապահովումը: Վերջինիս լուծման նպատակով առաջարկված է բացառապես տեխնոլոգիական շեղումների (ՏՇ) գրանցման նոր եղանակ: Այն թույլ է տալիս, բացառելով ջերմաստիճանի ու սնման լարման փոփոխության ազդեցությունը, ճշգրիտ գրանցել ՏՇ-երը: Արդյունքում ստացվող թվային ազդանշանը հնարավորություն է ընձեռում այն կիրառել թվային հանգույցների կողմից հետագա մշակման համար:

Առանցքային բաներ. տեխնոլոգիական շեղումներ, ենթաշեմային հոսանք, գրանցման ճշտություն:

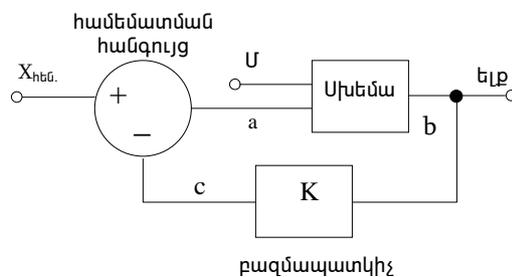
ՏՇ-երի գրանցման ու վնասագերծման առկա եղանակների սահմանափակվածությունը: ՏՇ-երը ԻՍ-երի պատրաստման ընթացքում դրանց կազմում ընդգրկված տարրերի երկրաչափական, էլեկտրական և այլ բնույթի պարամետրերի շեղումներն են նախատեսված արժեքներից: Վերջիններիս պատճառով մեծանում են ԻՍ-ի կազմում ընդգրկված առանձին տարրերի կորստի հոսանքները, տրամաբանական փականների հապաղումների ցրվածությունները և այլն: Այս ամենը հանգեցնում է ժամանակակից ԻՍ-երի նախագծման ինչպես ողջ գործընթացի, այնպես էլ դրա առանձին փուլերի (օրինակ՝ սխեմատեխնիկական մոդելավորման) էական բարդացմանը: Դա հատկապես բնորոշ է ԻՍ-երի արտադրման 90 նմ և ավելի ցածր նորագույն տեխնոլոգիաներին:

Ազդեցության տեղից կախված՝ ՏՇ-երը տարբերակվում են միջսխեմայինի (ՄՍ) և ներսխեմայինի (ՆՍ) [1]: Ըստ բնույթի ՏՇ-երը լինում են պատահական և ոչ պատահական: Առաջինները նկարագրվում են հավանականային բաշխման ֆունկցիաներով, իսկ մյուսները՝ փորձնական և տեսական եղանակներով ստացված բանաձևերով: ՏՇ-երի հավանականային բնույթը [1] պայմանավորված է դրանք առաջացնող աղբյուրների ու արտադրության փուլերի բազմազանությամբ ու բնույթով [2]: Օրինակ, այդպիսի փուլերից մեկում՝ լիտոգրաֆիայում [2], շեղումների

պատճառներ կարող են դառնալ լուսակայման ժամանակ ԻՍ-ի ու դիմակի անհամապարփակությունը, տարածության մեջ ու ժամանակի ընթացքում լուսային հոսքի փոփոխությունը, ոսպնյակների հատկությունների, ինչպես նաև լուսացրման ու անդրադարձման համակարգերի հատկությունների փոփոխությունը և այլն: Արդյունքում առաջանում են ԻՍ-ի կազմում ընդգրկված տարրերի երկրաչափական չափերի շեղումներ, որոնցով պայմանավորված են դրանց գործնականում բոլոր պարամետրերը և

հատկությունները: Մեկ այլ օրինակ է խառնուրդների իոնային ներդրման սարքերի անկատարելությունը [2], որի հետևանքով խառնուրդների բաշխումը կարող է ԻՄ-ի երկայնքով փոխվել: Դա հանգեցնում է մետաղ-օքսիդ-կիսահաղորդիչ (ՄՕԿ) տրանզիստորի հարթակի կոնցենտրացիայի, ակունքի և արտաբերի տիրույթների դիմադրության փոփոխմանը և այլն: Հատկանշական է, որ չոր (իոնային) խաճատման [2] պատճառով խիտ դասավորված տարրերի վարքագիծն ավելի է շեղվում նախատեսվածից, քան նոսրի դեպքում: ՏՇ-ի այլ աղբյուր է նաև տեխնոլոգիական գործընթացի տարբեր փուլերի ընթացքում ներդրված խառնուրդների ու արատների ակտիվացման նպատակով կատարվող արագ ջերմային տաքացումը [2]: Ջերմաստիճանի տատանումները հանգեցնում են խառնուրդների բաշխման փոփոխությունների, արատների մասնակի վերացման և այլ անցանկալի հետևանքների: Արդյունքում տեղի են ունենում ՄՕԿ տրանզիստորների մի շարք կարևոր հատկությունների էական փոփոխություններ, որոնք հատկապես վերաբերում են կորստի հոսանքին ու շեմային լարմանը:

ՏՇ-երի գրանցման ժամանակակից գրեթե բոլոր սխեմաների հիմքում ընկած [3] եղանակի դեպքում պարամետրի փոփոխության գրանցման նպատակով դրա ուղղակի կամ ձևափոխված տարբերակի՝ հենակային մեծության հետ համեմատման արդյունքում ձևավորվում է էլքային ազդանշան, որի միջոցով կարգաբերվում է փոփոխված պարամետրի արժեքը: Նշված սկզբունքը կիրառված է, օրինակ, ճակատի ու հապաղման չափմամբ ՏՇ-երի գրանցման սխեմաներում (նկ.1) [3]: Դրանցում, պարզության համար, ընտրված է փոփոխականների միատեսակ չափողականություն: $X_{հեն}$ -ը ՏՇ-երից անկախ հենակային մեծությունն է: Մ-ը ՏՇ-երի ազդեցությանը ենթակա սխեմայի մուտքային վեկտորն է, իսկ b -ն՝ դրա էլքը: a -ն սխեմայի այնպիսի մուտք է, որի միջոցով կարելի է փոփոխել էլքային b մեծության արժեքը՝ հաստատուն պահելով Մ-ը: Այսպիսի մուտքն անվանվում է ճշգրտող, քանի որ դրա միջոցով է ճշգրտվում սխեմայի՝ ՏՇ-երին ենթարկված պարամետրը: K հանգույցը էլքային b մեծությունը բազմապատկում է K անգամ ($c = K \text{ գ}$):



Նկ.1. ՏՇ-երի գրանցման սարքի ընդհանրացված կառուցվածքը

Համեմատման հանգույցի էլքում ձևավորվում է a ազդանշանը: Գրանցող սարքի նկարագրության պարզեցման նպատակով կատարված են հետևյալ ենթադրությունները՝

1. $X_{հեն}$ -ը ենթակա չէ ՏՇ-երի ազդեցությանը, $\Delta X_{հեն}=0$:
2. $b=f(a)$ կախվածությունը մոնոտոն է և $b_{a=0} \rightarrow 0$:

Հատկանշական է, որ կատարված ենթադրությունները տեղի ունեն իրական սարքերի մեծամասնության մոտ: ՏՇ-երի ազդեցությամբ համակարգի առանձին հանգույցներում առաջացած փոփոխությունները կբնութագրվեն հետևյալ կերպ.

$$\begin{cases} \Delta b = f_1(\Delta a) & \text{սխեմա} \\ \Delta c = K\Delta b & \text{բազմապատկի } \xi \\ \Delta a = \Delta X_{\text{հեց}} - \Delta c = -\Delta c & \text{համեմատման հանգույց} \end{cases} \quad (1)$$

Երկրորդ և երրորդ հավասարումները տեղադրելով առաջինի մեջ, կստանանք՝

$$\Delta b = -Kf_1(\Delta b), \quad (2)$$

որից՝

$$\frac{\Delta b}{f_1(\Delta b)} = -K : \quad (3)$$

ՏՇ-երի ազդեցության վերացման նպատակով ելքային մեծության ցրումը պետք է նվազարկվի՝ $\Delta b \rightarrow 0$: (3)-ի մեջ անցնելով սահմանի, երբ $\Delta b \rightarrow 0$, կստանանք՝

$$\frac{\lim_{\Delta b \rightarrow 0} \Delta b}{\lim_{\Delta b \rightarrow 0} f_1(\Delta b)} = \frac{1}{\lim_{\Delta b \rightarrow 0} f_1'(\Delta b)} \rightarrow \infty = K : \quad (4)$$

Գործնականում $\Delta b \rightarrow 0$ պայմանն անիրագործելի է՝ իրական հանգույցներին բնորոշ անկատարելությունների պատճառով: Դրանք են. $X_{\text{հեց}}$ -ի փոփոխականությունը, $b(a)$ կապի ոչ միարժեքությունը, K -ի վերջավոր արժեքը, մեծությունների թերի կերպափոխումը: Որքան թույլ է նշված գործոնների ազդեցությունը, այնքան մեծ է ՏՇ-ի վնասազերծման չափը:

ՏՇ-երի գրանցման սարքի (նկ.1) միջոցով որևէ մեծության վրա ՏՇ-ի ազդեցության նվազեցման նպատակով օգտագործվում է ընդամենը մեկ հենակային մեծություն (օրինակ՝ լարում), իսկ հարկ եղած դեպքում՝ նաև մեծությունների փոխակերպիչ (օրինակ՝ լարում-հաճախություն): Մակայն, գործնականում, ամենադժվարը հենց հենակային մեծության ստացումն է: Հենակային հոսանքի և լարման աղբյուրներում [4,5] հիմնականում օգտագործվում են հենակային մեծության ստացման հետևյալ սկզբունքները.

- դիողի կամ երկբևեռ տրանզիստորների ուղիղ լարման ջերմաստիճանային կախվածությունների օգտագործում,
- ՄՕԿ տրանզիստորի շեմային լարման և շարժունակության ջերմաստիճանային կախվածությունների փոխադարձ չեզոքացում,
- տարբեր շեմային լարումների տարբերության ջերմաստիճանային կախվածության օգտագործում [4],
- ՄՕԿ տրանզիստորների ենթաշեմային հոսանքի ու փական-ակունք լարման ջերմաստիճանային կախվածությունների գումարում [5]:

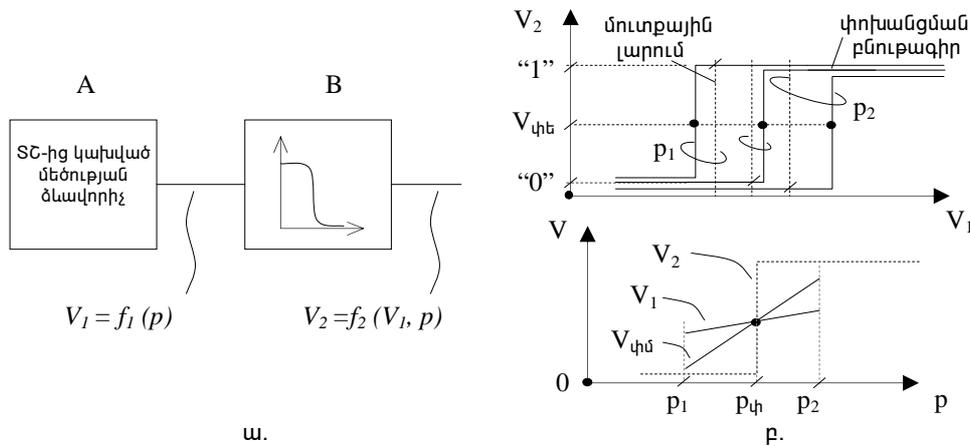
Չնայած ՏՇ-երի գրանցման նկարագրված եղանակի հուսալիությանն ու լայն կիրառությանը՝ դրա հիմնական թերությունն արդյունավետության խիստ կախվածությունն է դրանում կիրառվող հենակային մեծության ճշտությունից:

ՏՇ-երի գրանցման առաջարկվող եղանակը

ՏՇ-երի գրանցման մշակված եղանակի առավելությունը դրա իրագործմամբ սխեմաներում հենակային լարման ու հոսանքի աղբյուրների բացակայությունն է: Նշված հանգամանքը ԻՄ-ի հոսանքի ու մակերեսի փոքրացման հնարավորություն է

ընձեռում: Գրանցման արդի եղանակների իրագործմամբ սխեմաներում ճշտության սահմանափակման հիմնական պատճառը դրանց կազմում ընդգրկված հենակային հոսանքի և լարման աղբյուրների՝ ՏՇ-երի նկատմամբ ունեցած խիստ զգայունությունն է:

Ներկայացված եղանակի միջոցով գրանցվում են ոչ միայն N, այլև P, միաժամանակ N և P տիպի ՄՕԿ տրանզիստորների շեղումները, ընդ որում, գրանցվող մեծության վրա ազդող մյուս բոլոր գործոնների ազդեցությունը փոքրացվում է: Մասնավորապես, սնուցումից անկախ լարման և հոսանքի ձևավորման կառուցվածքների [5,6] օգտագործմամբ վերացվում է սնման լարման ազդեցությունը, իսկ ԻՄ-ի թեստավորման փուլում հատուկ սարքերի միջոցով ջերմաստիճանի հաստատուն պահմամբ նվազարկվում է վերջինիս ազդեցությունը:



Նկ.2. Գրանցող սարքի կառուցվածքը (ա) և համապատասխան ազդանշանները (բ)

Մշակված եղանակի իրագործմամբ գրանցող սարքը (նկ.2) բաղկացած է երկու հանգույցներից: A-ն ՏՇ-երից կախված մեծության ձևավորման հանգույցն է, B-ն՝ ուժեղարարի բնութագրով (նկ.2բ) քառաբևեռ, V_2 -ը՝ գրանցող ազդանշան: ՏՇ-երին ենթակա p փոփոխականի յուրաքանչյուր մեծությանը համապատասխանում է տրանզիստորի պարամետրերի (շեմային լարում, լիցքակիրների շարժունակություն, հոսքուղու լայնություն) արժեքների հավաքածու: Գրանցող սարքի ազդանշանները բերված են նկ.2բ-ում: Վերևում ցույց են տրված p_1 և p_2 արժեքների դեպքում B հանգույցի փոխանցման բնութագիրն ու մուտքային լարումը (V_1): Փոխանցատման ելքային լարումը նշանակված է $V_{\phi\epsilon}$ -ով, իսկ համապատասխան մուտքային լարումը՝ $V_{\phi\mu}$ -ով: Ստորին նկարում ցույց է տրված $V_{\phi\mu}$ և V_1 լարումների փոփոխությունը, ինչպես նաև p-ից կախված ելքային V_2 ազդանշանը: Մշակված եղանակով ՏՇ-երի գրանցման ու դրա մասին տեղեկության ձևավորման անհրաժեշտ և բավարար պայմանը B հանգույցի մուտքային ու փոխանցատման մուտքային լարումների՝ ըստ p-ի ածանցյալների անհավասարությունն է (նկ.2.բ)՝

$$\left. \frac{\partial V_1}{\partial p} \right|_{p_\phi} \neq \left. \frac{\partial V_{\phi\mu}}{\partial p} \right|_{p_\phi}, \quad (5)$$

որտեղ p_ϕ -ն $V_{\phi\mu}(p)$ և $V_1(p)$ կորերի հատման կետն է: Գրանցման արդյունք հանդիսա-

ցող էլքային երկուական ազդանշանը կամ բիթը կարող է օգտագործվել այլ թվային կամ անալոգային հանգույցների կողմից հետագա մշակման համար:

Առաջարկված եղանակի տրանզիստորային մակարդակով իրագործման նպատակով օգտագործված է ուժեղ շրջման ու ենթաշեմային տիրույթներում տրանզիստորի հոսանքի շեմային լարումից կախվածության՝ որակապես միմյանցից տարբերվող բնույթները [7,8]: Հետագա հաշվարկներում p փոփոխականը փոխարինված է շեմային լարմամբ դրա գերակշռող ազդեցության պատճառով: Ուժեղ շրջման ու ենթաշեմային տիրույթների համար հազեցման վիճակում աշխատող երկար հոսքուղով տրանզիստորի հոսանքը որոշվում է [7,8]՝

$$I_1 = \mu C_{\text{օբս}} \frac{W_1}{L_1} (V_{\text{փ}} - V_{2\text{եհ}})^2 (1 + \lambda V_{\text{արտ}}) \quad (6)$$

$$I_2 = \mu C_{\text{աղբ}} \frac{W_2}{L_2} V_T^2 e^{\left(\frac{V_{\text{փ}} - V_{2\text{եհ}}}{mV_T}\right)} (1 + \lambda V_{\text{աղբ}})$$

արտահայտություններով, որտեղ $V_{\text{փ}}$ -ն, $V_{\text{արտ}}$ -ն, $V_{2\text{եհ}}$ -ը համապատասխանաբար փականի, արտաբերի, շեմային լարումներն են, μ -ն՝ լիցքակիրների շարժունակությունը, λ -ն՝ հոսքուղու մոդուլացման գործակիցը, W -ն, L -ը՝ հոսքուղու լայնությունն ու երկարությունը, V_T -ն՝ ջերմային պոտենցիալը, $m = 1 + C_{\text{աղբ}}/C_{\text{օբս}}$: $C_{\text{օբս}}$ և $C_{\text{աղբ}}$ -ը փականի ու դրա տակ գտնվող աղբատացված տիրույթի տեսակարար ունակություններն են և որոշվում են [7,8]՝

$$C_{\text{օբս}} = \frac{\epsilon \epsilon_{\text{SiO}_2}}{t_{\text{օբս}}}, \quad (7)$$

$$C_{\text{աղբ}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{Si}} e N_h}{4 \phi_B}}$$

արտահայտություններով, որտեղ ϵ_{Si} , ϵ_{SiO_2} -ն սիլիցիումի և դրա օքսիդի դիէլեկտրիկ թափանցելիություններն են, $t_{\text{օբս}}$ -ը՝ օքսիդի հաստությունը, N_h -ն՝ հարթակում լիցքակիրների կոնցենտրացիան, ϕ_B -ն՝ հարթակում Ֆերմի պոտենցիալը [7]:

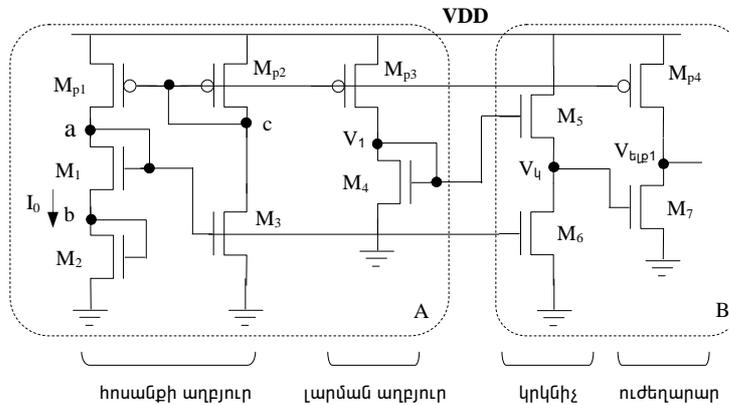
ՏՇ-երը գրանցող սխեման (նկ.3) կազմված է հոսանքի և լարման աղբյուրներից, ուժեղարարից և ակունքային կրկնիչից: Գծիկներով ձախ շրջանակի մեջ ներառված մասը (A) նկ.2-ում բերված սարքի A հանգույցի իրագործումն է, իսկ աջ մասը՝ B-ինը: Աղբյուրը ինքնաշեղման եղանակի [6] օգտագործմամբ ՏՇ-ից կախված հոսանք է ձևավորում: Հաշվի առնելով բոլոր տրանզիստորների հոսքուղու երկարության մեծ լինելու փաստը և հոսանքի աղբյուրի տրանզիստորների՝ հազեցման մեջ գտնվելու հանգամանքը՝ ստացվում է՝

$$I_0 = \mu C_{\text{օբս}} V_{2\text{եհ}}^2 P_0, \quad (8)$$

$$\text{որտեղ } P_0 = \frac{W_{M_2}/L_{M_2} \cdot W_{M_3}/L_{M_3}}{2\left(\sqrt{W_{M_2}/L_{M_2}} - 2\sqrt{W_{M_3}/L_{M_3}}\right)^2}:$$

Լարման աղբյուրի ձևավորած V_1 լարումը որոշվում է I_0 հոսանքով ու M_{p3} , M_4 տրանզիստորների չափերով: M_5 և M_6 տրանզիստորներից կազմված կրկնիչի գործածության

նպատակը M_7 տրանզիստորին ենթաշեմային տիրույթում պահելն է: Քանի որ M_{p1} - M_{p4} P տիպի ՄՕԿ տրանզիստորները կազմում են հոսանքի հայելի [8], ՏՇ-ին ենթակա դրանց պարամետրերի փոփոխության ազդեցությունը համակարգի հոսանքի վրա աննշան է:



Նկ.3. ՏՇ գրանցող սխեմայի կառուցվածքը

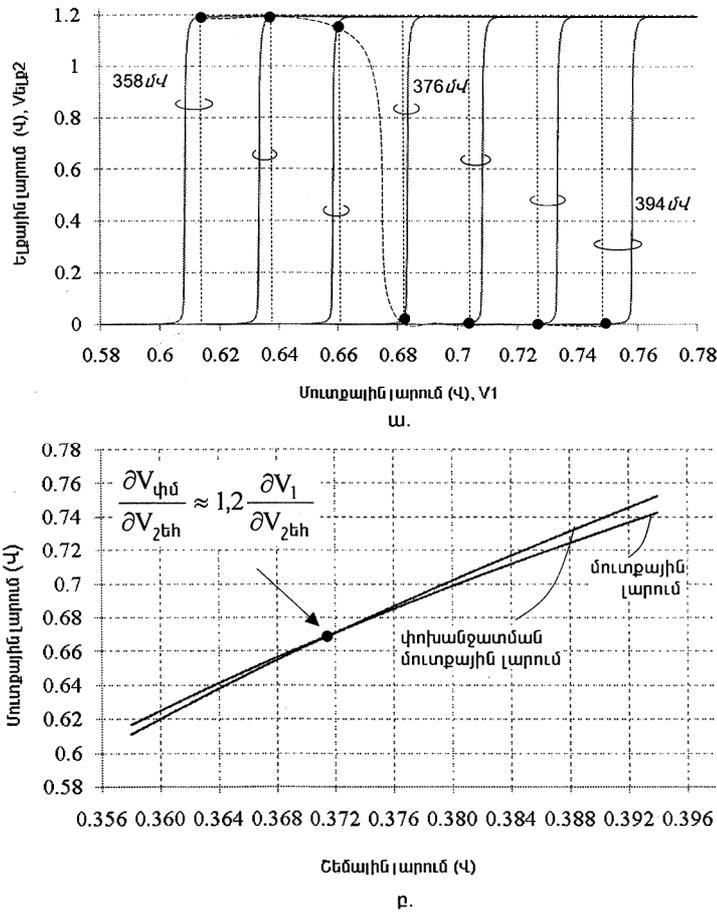
(5-7) հավասարումներից ստացվում է՝

$$\begin{cases} V_1 = V_{2th} \left(1 + \sqrt{\frac{2P_0}{s_{1w}}} \right) \\ V_{\text{տ5B}} = mV_T \ln \left(\frac{C_{\text{օքս}}}{C_{\text{աղբ}}} \cdot \frac{V_{2th}^2 P_0}{s_{\text{ուժ}} V_T^2 (1 + \lambda V_{tp1})} \right) + V_{2th} \left(2 + \sqrt{\frac{P_0}{s_{\text{կրկ}}}} \right) \end{cases}, \quad (9)$$

որտեղ $s_{1w} = r1qW_{M4}/L_{M4}$, $s_{կրկ} = r2qW_{M5}/L_{M5}$, $s_{ուժ} = r3qW_{M7}/L_{M7}$, $r1 = W_{Mp3}/W_{Mp2}$, $r2 = W_{M6}/W_{M3}$, $r3 = W_{Mp4}/W_{Mp2}$: V_{tp1} -ը ելքային լարումն է, որը հավասար է սնման լարման կեսին: s_{1w} , $s_{կրկ}$, $s_{ուժ}$, $r1$, $r2$, $r3$ պարամետրերն ընտրվում են (9)-ի հիման վրա՝ հաշվի առնելով (4) պայմանը: Սխեմայի ճիշտ նախագծման դեպքում M_7 տրանզիստորի վրա կառուցված ուժեղարարի փոխանցատման ժամանակ տրանզիստորը պետք է աշխատի ենթաշեմային տիրույթում, ինչի ապահովման նպատակով ուժեղարարի մուտքային լարումն ընտրվում է 0,2...0,3 Կ:

Մոդելավորման արդյունքները

Առաջարկված եղանակի ճշտության ու արդյունավետության գնահատման նպատակով կատարվել է մշակված գրանցող սխեմայի սխեմատեխնիկական վերլուծություն Synopsys ընկերության HSPICE ծրագրային գործիքի միջոցով: ՏՇ-երի մոդելավորման համար փոփոխվել են տրանզիստորի առավելագույն շեղումներով պարամետրերը [1-3,5], որոնցից են շեմային լարումը, լիցքակիրների շարժունակությունը, հոսքուղու երկարությունն ու լայնությունը, փականի օքսիդի հաստությունը: Շեմային լարման տարբեր արժեքների դեպքում (նկ.4) ստացվել են ուժեղարարի մուտքային լարման ու փոխանցման բնութագրերը: Գրանցող սարքի փոխանցման բնութագիրն ու մուտքային լարումը փոփոխվել են տարբեր արագությամբ, ինչը հանգեցրել է ելքային ազդանշանի (գծիկավոր կոր) փոխանցատմանը:

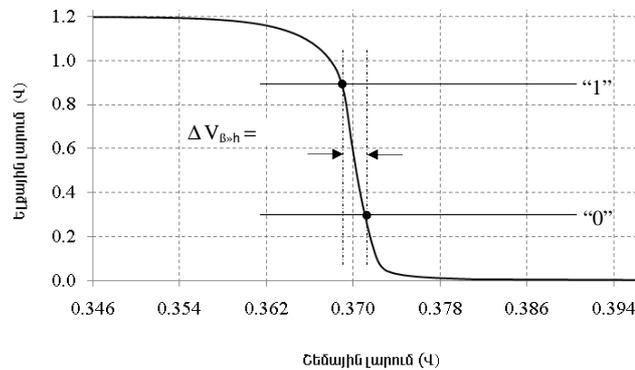


Նկ.4. Շեմային լարման տարբեր արժեքների դեպքում ուժեղարարի փոխանցման բնութագիրը (ա), մուտքային ու փոխանջատման մուտքային լարումների կախումը շեմային լարումից (բ)

V_1 և $V_{\text{փմ}}$ լարումների ածանցյալներն ըստ շեմային լարման վկայում են (4) պայմանի գոյության մասին: Գրանցող սարքի էլքային ազդանշանի փոխանջատման հետագոտման նպատակով շեմային լարումը փոխվել է 358 մՎ-ից մինչև 394 մՎ, և չափվել է էլքային ազդանշանը (նկ.4.բ): Վերջինիս տրամաբանական մակարդակի փոփոխությունն առաջացնող շեմային լարման նվազագույն արժեքը կազմել է 2,2 մՎ՝ տրամաբանական մակարդակների սահմանային՝ 0,3 Վ (“0”) և 0,9 Վ (“1”) արժեքների դեպքում: Գրանցման ճշտության նման սահմանափակումը պայմանավորված է ուժեղարարի ուժեղացման գործակցի վերջավոր արժեքով, ինչպես նաև $V_{\text{փմ}}$ և V_1 լարումների ածանցյալների փոքր տարբերությամբ:

Նախագծված սխեմայում տրանզիստորների հոսքուղու մեծ երկարության ($L \geq 5 \text{ մկմ}, W \geq 1 \text{ մկմ}$) և ՏՇ-երով պայմանավորված երկրաչափական չափերի չնչին փոփոխության (<math>< 0.5\%</math>) պատճառով, դրանց գրանցում չի կատարվել: Ավելին, (9) հավասարումները, ինչպես նաև մոդելավորման արդյունքները հաստատում են

շարժունակությունից էլքային լարման անկախության փաստը: Այս պատճառով էլ հոսքուղու լայնության, երկարության ու շարժունակության մոդելավորման առանձին արդյունքները ներկայացված չեն:

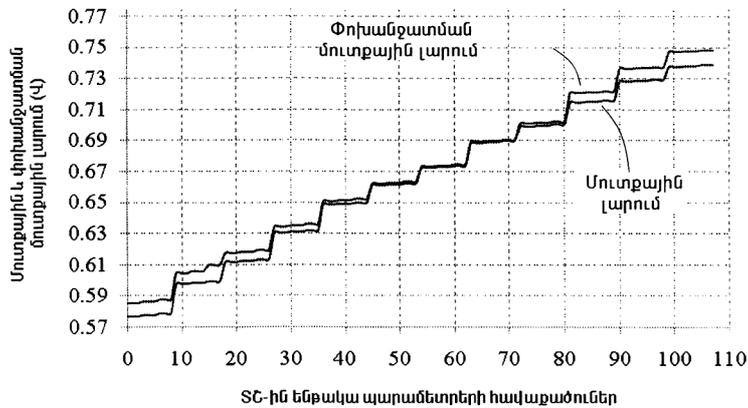


Նկ.5. Ելքային $V_{էլքային}$ լարման կախվածությունը շենային լարումից

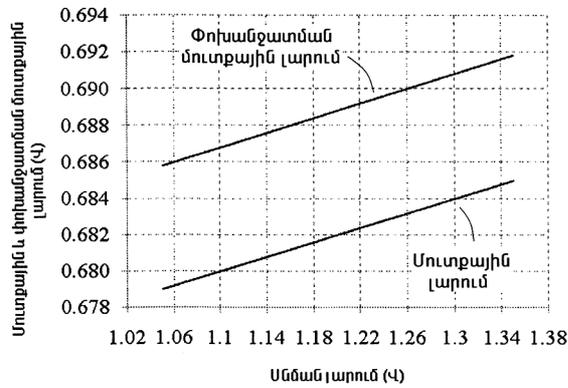
ՏՇ-երի առկայության ժամանակ տրանզիստորի՝ միմյանցից անկախ մի քանի պարամետրերի միաժամանակյա փոփոխության պատճառով գրանցում ասելով հասկացվում է ոչ թե մեկ (օրինակ՝ շենային լարում), այլ դրանց համատեղ փոփոխության արդյունքում առաջացած հոսանքի կամ լարման շեղումների գրանցումը: Հետևաբար՝ սարքը նախագծվում է (4) պայմանի՝ բոլոր պարամետրերի համար (միաժամանակյա(բավարարմամբ: Նշված պայմաններում սխեմայի գրանցման հնարավորությունը ստուգելու նպատակով մոդելավորման ընթացքում փոփոխվել են շենային լարումը, շարժունակությունը, հոսքուղու լայնությունը, երկարությունը և օքսիդի հաստությունն այնպես, որ $V_{ֆօֆ}$ և V_1 լարումներն աճեն (նկ.6ա): Շարժունակությունը ցույց չի տրված վերջինիս աննշան ազդեցության պատճառով: Պարամետրերի արժեքների դիսկրետության պատճառով կորերն աստիճանաձև են: Նկ.6ա-ից երևում է, որ նույնիսկ տարբեր պարամետրերի միաժամանակյա ազդեցության դեպքում սխեման գրանցում է ՏՇ-երը: Պատճառն այն է, որ (4) պայմանը տեղի ունի նաև այս դեպքում:

Քանի որ սխեմայի հոսանքները ձևավորվում են սնուցումից անկախ հոսանքի

ձևավորման հանգույցի միջոցով (նկ.3-ում՝ հոսանքի աղբյուր) , ստուգվել է նաև սնման լարումից նշված լարումների կախումը (նկ.6բ): Արդյունքներից պարզ է, որ երկու լարումներն էլ փոխվում են գրեթե նույն արագությամբ, ինչը երաշխավորում է, որ սնման լարման փոփոխությունը չի հանգեցնի կեղծ գրանցման: Փոքր է (<2) նաև այդ լարումների հարաբերական փոփոխությունը:



ա.



բ.

Նկ.6. Մուտքային և փոխանջատման մուտքային լարման կախումը պարամետրերի հավաքածուներից (ա), սնման լարումից (բ)

Եզրակացություն

Առաջարկված է առանց հենակային լարման ու հոսանքի աղբյուրների կիրառման տեխնոլոգիական շեղումների գրանցման եղանակ, որն ապահովել է գրանցման մեծ ճշտություն: Վերջինիս պարզության շնորհիվ սխեմայի չնչին փոփոխմամբ կարելի է մեծացնել գրանցման ճշտությունը, իսկ ելքային ազդանշանի թվային բնույթը թույլ է տալիս ՏՇ-երի մասին տեղեկությունը մշակել թվային հանգույցների կողմից: Եղանակի ճկունության շնորհիվ կարելի է գրանցել ոչ միայն N, այլև P տիպի ՄՕԿ տրանզիստորների պարամետրերի շեղումները:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Ayhan A. Mutlu and Mahmud Rahman.** Statistical methods for the estimation of process variation effects on circuit operation // IEEE Trans. Electronics packaging manufacturing. - Oct., 2005. - Vol. 28, N 4. - P. 364-375.
2. **Pang L., Nikolic B.** Measurements and analysis of process variability in 90nm CMOS // IEEE J. Solid-State Circuits. – May, 2009. - Vol. 44, N 5.- P. 1655-1663.
3. **Ghosh A., Rao R., Kim J., Chuang C. and Brown R.** On-cip variation detection using slew rate monitoring circuit // 21st International Conference on VLSI Design. - 2008. - P. 143-147.
4. **Watanabe H., Ando S., Aota H., Dainin M. Chun Y. and Taniguchi K.** CMOS voltage reference based on gate work function differences in poly-Si controlled by conductivity type and impurity concentration // IEEE J. Solid-State Circuits – June, 2003. - Vol. 38, N 6. - P. 987-994.
5. **Filanovsky M. and Allan A.** Mutual compensation of mobility and threshold voltage effects with applications in cmos circuits // IEEE Trans. Circuits and Systems. – July, 2001. - Vol. 48, N 7. - P. 876-884.
6. **Huang P., Lin H. and Lin Y.** A simple subthreshold cmos voltage reference circuit with channel length modulation compensation // IEEE Trans. Circuits and Systems. - Sept., 2006. - Vol. 53, N 9. - P. 882-885.
7. **Kim T., Keane J., Eom H., Kim C.** Utilizing reverse short-channel effect for optimal Subthreshold circuit design // IEEE Trans. VLSI Systems. – July, 2007. - Vol. 15, N 7. - P. 821-829.
8. **Razavi B.** Design of analog integrated circuits. - Prentice Hall, 2009.

ՀՊՃՀ (Պ): Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 07.03.2010:

**В.Ш. МЕЛИКЯН, Д.Л. МИРЗОЯН, А.Н. ХАЧАТРЯН, А.Г. САРГСЯН,
Д.Х. ГРИГОРЯН, Э.О. МУСАЕЛЯН**

**МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗБРОСОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОП ТРАНЗИСТОРОВ**

В современных интегральных схемах (ИС) неидеальности отдельных этапов полупроводниковых технологий становятся причиной разбросов параметров компонентов, в том числе и транзисторов. Они негативно влияют на надежность ИС, поэтому важной проблемой проектирования современных ИС являются обеспечение надежности и функциональности в условиях технологических разбросов. Для решения последней задачи предложен метод обнаружения технологических разбросов (ТР), позволяющий точно обнаружить ТР, исключая изменение температуры и питания. Полученный впоследствии цифровой сигнал позволяет использовать его в цифровых узлах для дальнейшей обработки.

Ключевые слова: технологические разбросы, подпороговый ток, точность обнаружения.

**V. SH. MELIKYAN, D. L. MIRZOYAN, A. N. KHACHATRYAN, A. G. SARGSYAN,
D.Kh. GRIGORYAN, E.H. MUSAYELYAN**

PROCESS VARIATION DETECTION METHOD USING MOS TRANSISTORS

In contemporary integrated circuits (IC) the imperfections of semiconductor technological processes give rise to variations of elements including transistor parameters. They have negative affect on IC reliability. That is why one of the modern problems of IC design is the provision of functional capabilities and reliability under process variation (PV). To solve the latter, a new method of PV detection is proposed. It allows accurately detecting PV, excluding the affect of temperature and supply voltage changes. The obtained digital signal enables to use it for future processing by digital cells.

Keywords: process variation, subthreshold current, detection accuracy.

М.В. МАРКОСЯН, В.Г. АВETИСЯН, С.Г. ЭЙРАМДЖЯН

ПОЭТАПНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СБОРКЕ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Предлагается методика поэтапной аттестации составных единиц активной фазированной антенной решетки при ее последовательной сборке. Аттестация включает в себя электрическое тестирование, электрическое юстирование и паспортизацию. В начале каждого конкретно-рассматриваемого этапа предусматривается контрольное тестирование конечных сборочных единиц предыдущего этапа, входящих в состав каждой единицы рассматриваемого этапа. Контрольное тестирование каждой конечной сборочной единицы предыдущего этапа осуществляется в ее отъюстированном состоянии – в режиме синфазного и равноамплитудного возбуждения составляющих её сборочных единиц.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, приемопередающая единица, электрическое тестирование и юстирование.

Изготовление активной фазированной антенной решетки (АФАР) и ее приведение в готовность к работе с целью получения заложенных при её проектировании параметров требуют значительных усилий и затрат. При этом выполняется последовательная сборка составных единиц АФАР в единую антенную систему. Электронно-управляемые дискретные аттенюаторы, фазовращатели, переключатели, усилители мощности и малощумящие усилители объединяются в приёмопередающий модуль (ППМ); N штук ППМ объединяются в ячейку; M штук ячеек – в группу; K штук групп – в подрешётку, а F штук подрешёток – в единую систему АФАР. При монтаже и сборке новой сборочной единицы возможно нарушение исправности ее составных единиц.

Цель настоящей работы – отработка методик аттестации последовательных сборочных единиц и АФАР в целом как для контроля их электрических характеристик, так и для существенного снижения вероятности участия неисправной единицы в процессе последовательных укрупнений единиц при сборке АФАР.

Методы и аппаратура для аттестации ППМ в составе сборной ячейки, предложенные в [1-3], не позволяют выполнить аттестацию в полном объеме, поскольку в ее процессе не определяются поляризационные характеристики излучателей АФАР, которые могут работать не только на линейной, но и на круговой поляризации. В ряде случаев применение последней обусловлено повышением как помехоустойчивости радиотехнической системы, так и числа рабочих каналов. Методы же тестирования ППМ уже в составе АФАР [4-6] страдают наличием ошибок измерений, обусловленных влиянием на испытуемый ППМ остальных ППМ, не подлежащих в данный момент времени тестированию. При их же отключении на момент тестирования конкретного ППМ процедура аттестации становится сложной и

длительной, если учесть, что АФАР может содержать тысячи ППМ. Для требуемой комплексной аттестации ячеек с ППМ, работающих на круговой поляризации (более общий случай), были разработаны соответствующие методика и аппаратура и выполнены экспериментальные исследования [7-11].

В настоящей работе предлагаются методики аттестации последующих сборных единиц, а именно: групп, подрешеток и АФАР в целом. Сразу же отметим следующее.

1) В начале каждого конкретно-рассматриваемого этапа предусматривается контрольное тестирование конечных сборочных единиц предыдущего этапа, входящих в состав каждой единицы рассматриваемого этапа. Причём контрольное тестирование каждой конечной сборочной единицы предыдущего этапа осуществляется в режиме синфазного и равноамплитудного излучения составляющих её сборочных единиц. Упомянутое контрольное тестирование определяет работоспособность конечных сборочных единиц предыдущего этапа, а также разбросы их амплитудных и фазовых передаточных характеристик. На основе полученных данных о разбросах для каждой из этих единиц определяются корректировки по амплитуде и фазе для введения дополнительных затуханий и сдвигов по фазе, необходимых для их синфазного и равноамплитудного возбуждения в составе сборочной единицы рассматриваемого этапа. Такое состояние возбуждения составной единицы АФАР рассматриваемого этапа является окончательным результатом её электрической юстировки. Затем соответствующими измерениями проверяется правильность выполненной электрической юстировки тестируемой единицы и оформляется её паспорт по требуемым параметрам, чем и заканчивается конкретно-рассматриваемый этап.

2) Для последующих рассматриваемых этапов тестирования сборочных единиц предлагается использовать автоматический измерительный комплекс (АИК) по ближнему полю, изображенный на рис.1. АИК должен иметь пробный зонд (ПЗ), работающий на любой поляризации с возможностью синтеза и анализа ортогональных компонент поля в линейном базисе, и приемник, выдающий одновременно синфазную - I и противофазную - Q составляющие этих компонент отсчитываемого поля. Минимальные дискреты отсчета поля по осям X и Y должны быть равны расстояниям между центрами излучателей ППМ по соответствующим осям.

Методика аттестации сборной группы. В сборной группе тестируется каждый ППМ с целью определения их работоспособности после сборки ячеек в группу. Тестируемая группа ячеек, состоящая из N ППМ (N - количество ППМ в ячейке, M - количество ячеек в группе), устанавливается на опорно-поворотное устройство АИК и механически юстируется относительно сканируемого ПЗ на расстоянии Z_0 более 3λ между плоскостью сканирования ПЗ и излучающей поверхностью группы. Это расстояние является дальней зоной для излучателя каждого ППМ, поскольку

размеры излучателей ППМ обычно не превышают величину $\lambda/2$. Одновременно это расстояние является расстоянием ближней зоны для тестируемой группы [12].

Методика тестирования группы в режиме передачи предусматривает определение в точке отсчета поля ПЗ и при заданном рабочем уровне мощности на входе ППМ следующих величин:

- амплитуды $A_{Г_i}, A_{В_i}$ ортогональных линейных компонент (индексы: Г – горизонтальная, В – вертикальная) дальнего поля излучения каждого ППМ;
- фазы $\varphi_{Г_i}, \varphi_{В_i}$ ортогональных линейных компонент этого поля;
- уровень интенсивности суммарного излучения в точке отсчета поля, где i – порядковый номер ППМ в тестируемой группе;
- уровень интенсивности $I_i = (A_{Г_i}^2 + A_{В_i}^2)$ суммарного излучения в точке отсчета поля, где i – порядковый номер ППМ в тестируемой группе $\{i = 1 \dots (N \times M)\}$.

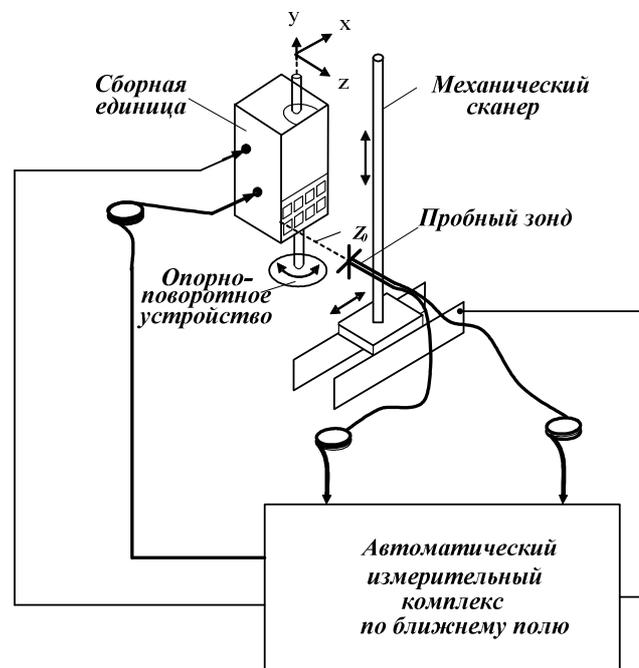


Рис.1. Автоматический измерительный комплекс

Траектория сканирования ПЗ показана на рис.2. В исходном состоянии ПЗ устанавливается так, чтобы нормаль, проходящая через центр излучателя 1 ППМ группы, проходила через продольную геометрическую ось ПЗ. Точность позиционирования по осям X и Y составляет ± 5 мм, что соответствует фазовой погрешности менее 1° при такой установке. После калибровки АИК ему задается программа определения вышеуказанных величин. При сканировании шаг дискретности отсчетов измерений поля ПЗ равен расстоянию между центрами излучателей ППМ.

При этом ППМ работают поочередно и синхронно с программой отсчета измерений. Это значит, что если ПЗ находится по центру, например, излучателя ППМ 15 (вторая строка снизу), то в режиме передачи работает только этот ППМ. Остальные ППМ - 2, 18, 31 этой составной ячейки (в данном случае состоящей из четверки ППМ) и все ППМ в оставшихся составных ячейках группы выключены, т.е. не излучают СВЧ сигналы. По массиву вышеуказанных величин определяются работоспособность каждого ППМ в режиме передачи и все параметры тестирования.

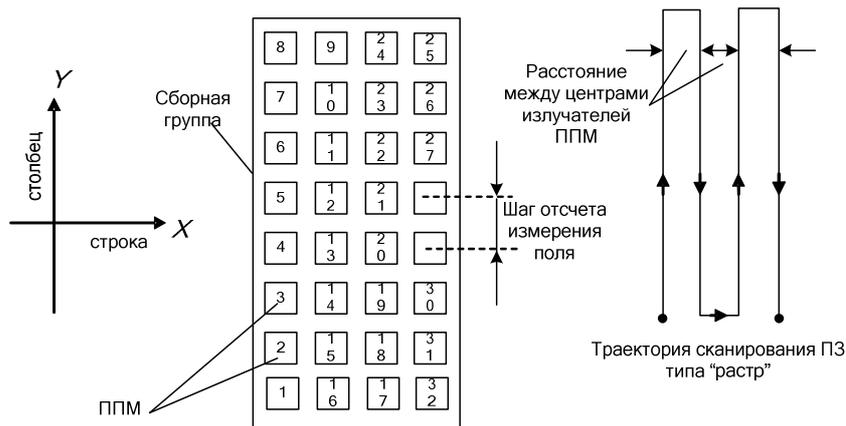


Рис.2. Траектория сканирования пробного зонда

Методика тестирования группы в режиме приема осуществляется аналогичным способом, с той лишь разницей, что ПЗ излучает для ППМ допустимый уровень мощности принимаемого сигнала нужной круговой поляризации, а модули группы поочередно, в вышеотмеченной последовательности, работают в режиме приема.

Электрическая юстировка группы производится согласно аналогичной методике, изложенной в [11]. В результате этой юстировки определяются необходимые предусматриваемые корректировки по амплитуде и фазе для электронно-управляемых дискретных, соответственно, аттенюатора и фазовращателя каждого ППМ с целью обеспечения их равноамплитудного и синфазного излучения в составе сборной группы. Юстировка оканчивается введением этих корректировок и их запоминанием в памяти компьютера.

Проверка выполненной электрической юстировки группы осуществляется следующим образом. При тестовых возбуждениях ППМ группы с различными видами распределения амплитуд и фаз волн круговой поляризации производятся измерения поля в ближней зоне группы и определяются ее параметры в дальней зоне. Эти параметры сравниваются с теоретически вычисленными параметрами для дальней зоны группы, которые соответствуют заданным тестовым возбуждениям.

При тестовых возбуждениях группы с различными видами распределения амплитуд и фаз волн, излучаемых модулями группы, теоретически вычисленными параметрами для дальней зоны группы являются;

- ширина главного лепестка ДН в Е- и Н- плоскостях на уровне 3 дБ;
- направление оси главного лепестка ДН относительно нормали к группе в отмеченных плоскостях;
- уровни боковых лепестков ДН в отмеченных плоскостях по заданным направлениям;
- уровень кроссполяризованной паразитной волны круговой поляризации в направлении оси главного лепестка ДН.

Измерения производятся с помощью того же АИК по ближнему полю и на выбранном ранее расстоянии ближней зоны между плоскостью сканирования ПЗ и излучающей поверхностью группы. Зонд устанавливается в левый нижний край зоны сканирования – в точку А (см. рис.3). Далее задается программа сканирования на измерение при выбранном тестовом возбуждении группы. Затем параметры дальнего поля, выданные компьютером, сравниваются с тестовыми параметрами. Расхождение по угловым параметрам должно быть менее $0,5^\circ$, по амплитудным параметрам – менее 1 дБ. По вышеизложенной методике проводятся испытания при каждом виде тестового возбуждения.

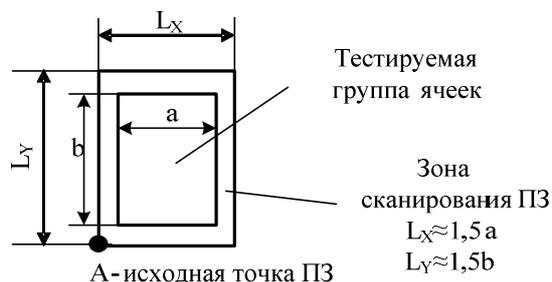


Рис.3. Зона сканирования

Составление паспорта на каждую исправную группу оканчивается (при удовлетворении отмеченных расхождений) внесением в составляемый паспорт группы предусматриваемых корректировок по амплитуде и фазе, хранящихся в компьютере.

Методика аттестации сборной подрешетки. Цель этого этапа – проверка работоспособности каждой группы в составе сборной подрешетки, выявление корректировок по амплитуде и фазе для каждой группы с целью достижения равноамплитудности и синфазности полей, излучаемых группами, составляющими подрешетку. Процедуры установки и механической юстировки тестируемой

подрешетки аналогичны этим процедурам для случая группы. Устанавливаются режимы работы составных ППМ всех групп тестируемой подрешетки в соответствии с занесенными в паспорта групп корректировками по амплитуде и фазе для каждого ППМ группы.

Методика тестирования подрешетки в режиме передачи. В процессе этого тестирования ПЗ последовательно производит отсчеты поля в точках плоскости сканирования, которые находятся на нормалях к центрам групп тестируемой подрешетки. При этом в точках отсчета поля ПЗ и при заданном рабочем уровне мощности на входе группы определяются следующие величины:

- амплитуды ортогональных линейных компонент ближнего поля излучения каждой группы;
- фазы ортогональных линейных компонент этого поля;
- уровень интенсивности $Y_j = (B_{Г_j}^2 + B_{В_j}^2)$ суммарного излучения в точке отсчета поля, где j - порядковый номер группы ($\psi_{Г_j}, \psi_{В_j}$); K - количество групп тестируемой подрешетки. По массиву вышеуказанных величин определяется работоспособность каждой группы в режиме передачи подрешетки.

Методика тестирования подрешетки в режиме приема осуществляется аналогичным способом, с той лишь разницей, что ПЗ излучает сигнал нужного уровня и нужной круговой поляризации, а группы работают в режиме приема, и при этом регистрируются комплексные амплитуды волны, принимаемой каждой группой тестируемой подрешетки.

Электрическая юстировка подрешетки осуществляется с целью обеспечения равноамплитудного и синфазного излучения всех групп, входящих в сборную подрешетку. В этом случае она производится следующим образом.

В массиве данных $Y_j = (B_{Г_j}^2 + B_{В_j}^2)$ и $\psi_{Г_j}$ ($j = 1, \dots, K$) производится сравнительный анализ с целью выбора минимального значения Y_{\min} из значений Y_j и максимального значения $\psi_{Г_{\max}}$ из значений $\psi_{Г_j}$. Вычисляются погрешность ΔY_j (дБ) по соотношению

$$\Delta Y_j (\text{дБ}) = 10 \lg \frac{Y_j}{Y_{\min}} \quad (1)$$

и фазовая погрешность $\Delta \psi_j$ по соотношению

$$\Delta \psi_j = \psi_{Г_{\max}} - \psi_{Г_j} \quad (2)$$

Если для какой-либо j -й группы $\Delta Y_j (\text{дБ}) \leq \Delta A_{\ominus \min}^{\text{Д}}$, величина корректировки $\Delta Y_j^{\text{Кор}} (\text{дБ})$ на затухание по амплитуде для этой группы (посредством введения дополнительного одновременного затухания всеми управляемыми дискретными аттенюаторами ППМ j -й группы) равна нулю, т.е. $\Delta Y_j^{\text{Кор}} (\text{дБ}) = 0$. Если же для какой-

либо j -й группы $\Delta Y_j(\text{дБ}) > \Delta A_{\oplus \min}^{\text{д}}$, т.е. превышает первый минимальный дискрет затухания, вводимый управляемым дискретным аттенюатором, то величина $\Delta Y_j^{\text{Кор}}(\text{дБ})$ (корректировка на затухание по амплитуде для всех ППМ этой группы, предусматриваемая и регистрируемая в памяти компьютера) равна значению дискрета затухания $\Delta A_{\oplus}^{\text{д}}(\text{дБ})$ (вводимого управляемым дискретным аттенюатором), ближайшего по значению к $\Delta Y_j(\text{дБ})$, т.е. $\Delta Y_j(\text{дБ}) = \Delta A_{\oplus}^{\text{д}}$, и на эту самую одинаковую величину предусматривается дополнительная корректировка по затуханию для всех ППМ j -й группы.

Аналогичным образом, если для какой-либо j -й группы $\Delta \psi_j \leq \Delta \phi_{\oplus \min}^{\text{д}}$, то величина корректировки $\Delta \psi_j^{\text{Кор}}$ на задержку по фазе для этой группы (посредством введения дополнительной одновременной задержки по фазе управляемыми дискретными фазовращателями ППМ j -й группы) равна нулю, т.е. $\Delta \psi_j^{\text{Кор}} = 0$. Если же для какой-либо j -й группы величина $\Delta \psi_j > \Delta \phi_{\oplus \min}^{\text{д}}$, т.е. превышает первый минимальный дискрет сдвига фазы, вводимый управляемым дискретным фазовращателем, то величина $\Delta \psi_j^{\text{Кор}}$ (корректировка на задержку по фазе для этой группы, предусматриваемая и регистрируемая в памяти компьютера) равна значению дискрета задержки по фазе $\Delta \phi_{\oplus}^{\text{д}}$ (вводимой управляемым дискретным фазовращателем), ближайшей по значению к $\Delta \psi_j^{\text{Кор}}$, т.е. $\Delta \psi_j = \Delta \phi_{\oplus}^{\text{д}}$, и на эту самую одинаковую величину предусматривается дополнительная корректировка задержки по фазе для всех ППМ j -й группы. В компьютере запоминается массив предусматриваемых дополнительных корректировок $\Delta Y_j^{\text{Кор}}(\text{дБ})$ и $\Delta \psi_j^{\text{Кор}}$ ($j=1, \dots, K$) для каждой группы тестируемой подрешетки с целью ее паспортизации. Электрическая юстировка подрешетки оканчивается введением соответствующих корректировок по амплитуде и фазе в группы тестируемой подрешетки.

Проверка выполненной электрической юстировки подрешетки и составление паспорта на каждую исправную подрешетку производятся по методике, аналогичной при проверке электрической юстировки и паспортизации групп.

Методика тестирования сборной АФАР. Цель этого этапа – проверка работоспособности подрешеток в составе сборной АФАР, выявление корректировок по амплитуде и фазе для каждой подрешетки для обеспечения равноамплитудности и синфазности полей, излучаемых подрешетками АФАР.

Опять же, тестируемая АФАР, составленная из F подрешеток, устанавливается на опорно-поворотное устройство АИК и механически юстируется относительно ПЗ на выбранном ранее расстоянии между плоскостью сканирования ПЗ и излучающей поверхностью АФАР. Устанавливаются режимы работы составных подрешеток АФАР

в соответствии с занесенными в паспорта подрешеток корректировками по амплитуде и фазе для каждой группы.

Методика тестирования сборной АФАР в режиме передачи. При измерениях ПЗ последовательно производит отсчеты поля в точках плоскости сканирования, которые находятся на нормалях к центрам подрешеток АФАР. В точках отсчета поля ПЗ и при заданном рабочем уровне мощности на входе подрешетки определяются следующие величины:

- амплитуды $C_{Гк}, C_{Вк}$ ортогональных линейных компонент ближнего поля излучения каждой подрешетки;
- фазы $\phi_{Гк}, \phi_{Вк}$ ортогональных линейных компонент этого поля;
- уровень интенсивности $T_k = (C_{Гк}^2 + C_{Вк}^2)$ суммарного излучения в точке отсчета, где k - порядковый номер группы ($k=1, \dots, F$), F - количество подрешеток в АФАР.

По массиву вышеуказанных величин определяется работоспособность каждой подрешетки в режиме передачи АФАР.

Методика тестирования сборной АФАР в режиме приема осуществляется аналогичным способом, с той лишь разницей, что ПЗ излучает сигнал нужного уровня и нужной круговой поляризации, а подрешетки работают в режиме приема, и при этом регистрируются комплексные амплитуды волны, принимаемой каждой подрешеткой.

Электрическая юстировка сборной АФАР с целью обеспечения равноамплитудного и синфазного излучения всех подрешеток в составе сборной АФАР осуществляется следующим образом.

В массиве данных $T_k = (C_{Гк}^2 + C_{Вк}^2)$ и $\phi_{Гк}$ ($k=1, \dots, F$) производится сравнительный анализ с целью выбора минимального значения T_{\min} из значений T_k и максимального значения $\phi_{Г\max}$ из значений $\phi_{Гк}$. Вычисляются погрешность ΔT_k (дБ) по соотношению

$$\Delta T_k \text{ (дБ)} = 10 \lg \frac{T_k}{T_{\min}} \quad (3)$$

и фазовая погрешность $\Delta \phi_k$ по соотношению

$$\Delta \phi_k = \phi_{Г\max} - \phi_{Гк} \quad (4)$$

Если для какой-либо k -й подрешетки $\Delta T_k \text{ (дБ)} \leq \Delta A_{\oplus \min}^{\text{д}}$, то величина корректировки $\Delta T_k^{\text{Кор}} \text{ (дБ)}$ на затухание по амплитуде для этой подрешетки (посредством введения дополнительного затухания отдельным управляемым дискретным аттенуатором данной подрешетки) равна нулю, т.е. $\Delta T_k^{\text{Кор}} \text{ (дБ)} = 0$. Если же для какой-либо k -й подрешетки $\Delta T_k \text{ (дБ)} > \Delta A_{\oplus \min}^{\text{д}}$, т.е. превышает первый минимальный дискрет затухания, вводимый этим управляемым дискретным

аттенюатором, то величина $\Delta T_k^{\text{Кор}}(\text{дБ})$ (корректировка на затухание по амплитуде для этой подрешетки, предусматриваемая и регистрируемая в памяти компьютера) равна значению дискрета затухания $\Delta A_{\oplus}^{\text{Д}}(\text{дБ})$ (вводимого управляемым дискретным аттенюатором данной подрешетки), ближайшего по значению к $\Delta T_k(\text{дБ})$, т.е. $\Delta T_k(\text{дБ}) = \Delta A_{\oplus}^{\text{Д}}$.

Аналогичным образом если для какой-либо k -й подрешетки $\Delta \phi_k \leq \Delta \phi_{\oplus \text{min}}^{\text{Д}}$, то величина корректировки $\Delta \phi_k^{\text{Кор}}$ на задержку по фазе для этой подрешетки (посредством введения дополнительной задержки по фазе отдельным управляемым дискретным фазовращателем данной подрешетки) равна нулю, т.е. $\Delta \phi_k^{\text{Кор}} = 0$. Если же для какой-либо k -й подрешетки величина $\Delta \phi_k > \Delta \phi_{\oplus \text{min}}^{\text{Д}}$, т.е. превышает первый минимальный дискрет сдвига фазы, вводимый этим управляемым дискретным фазовращателем, то величина $\Delta \phi_k^{\text{Кор}}$ (корректировка на задержку по фазе для этой подрешетки, предусматриваемая и регистрируемая в памяти компьютера) равна значению дискрета задержки по фазе $\Delta \phi_{\oplus}^{\text{Д}}$ (вводимой управляемым дискретным фазовращателем данной подрешетки), ближайшей по значению к $\Delta \phi_k^{\text{Кор}}$, т.е. $\Delta \phi_k = \Delta \phi_{\oplus}^{\text{Д}}$. В компьютере запоминается массив предусматриваемых дополнительных корректировок $\Delta T_k^{\text{Кор}}(\text{дБ})$ и $\Delta \phi_k^{\text{Кор}}$ ($k=1, \dots, F$) для каждой тестируемой подрешетки с целью паспортизации АФАР. Электрическая юстировка сборной АФАР оканчивается введением соответствующих корректировок по амплитуде и фазе в ее подрешетки.

Проверка выполненной электрической юстировки сборной АФАР и составление ее паспорта производятся аналогично предыдущим этапам. Опять же, устанавливается степень соответствия параметров излучения АФАР в ее дальней зоне, определенных из измерений по ближней зоне АФАР, с параметрами, теоретически вычисленными для дальней зоны АФАР, при ее тестовых возбуждениях с различными видами распределения амплитуд и фаз волн круговой поляризации, излучаемых модулями АФАР. Критериями сравнения являются установленные допустимые расхождения по угловым и амплитудным параметрам, при удовлетворении которых составляется паспорт на АФАР.

Таким образом, предлагаемая методика поэтапной аттестации позволяет четко и надежно выполнить процесс приведения АФАР в готовность к работе в соответствии с заданными требованиями на ее электрические параметры. При этом практически обеспечивается исключение дефектных единиц из процесса последующих укрупнений единиц АФАР. В результате будем иметь значительное сокращение дополнительных затрат времени и средств, неизбежных при изготовлении такой сложной системы, коей является АФАР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. EP Patent № 0762541. Device for calibrating and testing transmit/receive modules in an active electronically phased array antenna.- 12 Mar., 1997.
2. US Patent № 5081460 Method and apparatus for testing phase shifter modules of a phased array antenna.- 14 Jan., 1992.
3. **Копп В.А., Borkowski M., Jerinic G.** Transmit/receive Modules// IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – March, 2002. - Vol.50, № 3.- P. 827-834.
4. Measurement and Evaluation Techniques for An Airborne Active Phased Array Antenna/ **N. Kojima, K. Shiramatsu, I. Chiba et al** // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. - 15-18 October, 1996.- P. 231-236.
5. **Mulcahey J.K., Sarcione M.G.** Calibration and Diagnostics of the THAAD Solid State Phased Array in Planar Nearfield Facility// IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. - 15-18 October, 1996.- P. 322-326.
6. **Мартиросян С.М.** Измерение характеристик больших ФАР с помощью неподвижного зонда в зоне раскрыва// Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции.- Ереван, 1982.- С. 268-269.
7. **Маркосян М.В., Оганесян А.А., Эйрамджян С.Г.** Тестирование модулей активной фазированной антенной решетки. Сообщение 1: Методика тестирования// Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2007. -Т.LX, № 3.-С.516-522.
8. **Еугамъян S.G.** Apparatus Complex for Active Phased Array Module Testing// Mediterranean Microwave Symposium (MMS 2007), 14-16 May. – 2007. - Budapest, Hungary, 2007.- P.201-203.
9. Արտոնագիր №2022A2 Հայաստանի Հանրապետություն, ՄՄԴ G01S 7/03, G01S 7/40, H01Q 3/26, H01Q 21/00: Ակտիվ փուլավորված անտենային ցանցերի ընդունահանորդող մոդուլների տեստավորման սարք/ **Մ.Վ. Մարկոսյան, Ս.Գ. Էյրամջյան, Ա.Հ. Հովհաննիսյան, Վ.Հ. Ավետիսյան** (ՀՀ): Առաջնության թվ. 25.12.2006: Հրատարակման թվ. 17.09.2007:
10. **Аветисян В.Г., Маркосян М.В., Оганесян А.А., Эйрамджян С.Г.** Тестирование модулей активной фазированной антенной решетки. Сообщение 2: Эксперимент // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2008. Т.61, №4. - С.577-583.
11. **Маркосян М.В., Оганесян А.А., Аветисян В.Г.** Комплексная аттестация ячеек СВЧ активной фазированной решетки // Труды Международной научной конференции “Излучение и рассеяние электромагнитных волн” ИРЭМВ-2009. Таганрог – Дивноморское, Россия, 27 июня – 1 июля 2009. - 2009. - С. 285 -289.
12. **Фрадин А.З., Рыжков Е.В.** Измерения параметров антенно-фидерных устройств. - М.: Связь, 1972.-352 с.

АОЗТ “ЕрНИИСС”, Российско-Армянский (Славянский) университет. Материал поступил в редакцию 17.03.2010.

Մ.Վ. ՄԱՐԿՈՍՅԱՆ, Վ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ս.Գ. ԷՅՐԱՄՅԱՆ

**ԱԿՏԻՎ ՓՈՒԼԱՎՈՐՎԱԾ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ՓՈՒԼ ԱՌ ՓՈՒԼ ԱՏԵՍԱՎՈՐՈՒՄԸ
ՀԱՋՈՐԴԱԿԱՆ ՀԱՎԱՔՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ**

Առաջարկվում է ակտիվ փուլավորված անտենային ցանցի կառուցվածքային միավորների հաջորդական ատեստավորման մեթոդիկա: Ատեստավորումը ներառում է էլեկտրական տեստավորում, էլեկտրական ճշտադրում և անձնագրավորում: Յուրաքանչյուր առանձին դիտարկվող փուլի սկզբում նախատեսվում է նախորդ փուլի վերջնական, դիտարկվող փուլի յուրաքանչյուր միավորի կազմի մեջ մտնող հավաքական միավորների հսկիչ տեստավորում: Նախորդ փուլի յուրաքանչյուր վերջնական հավաքական միավորի, հսկիչ տեստավորումն իրականացվում է վերջինիս ճշտադրված վիճակում՝ այն կազմող հավաքական միավորների համափուլ և հավասար ամպլիտուդներով զրգուման ռեժիմում:

Առանցքային բառեր. ակտիվ փուլավորված անտենային ցանց, ընդունող-հաղորդող միավոր, էլեկտրական տեստավորում և ճշտադրում:

M.V. MARKOSYAN, V.H. AVETISYAN, S.G. EYRAMJYAN

**STEP-BY-STEP VALIDATION AT SEQUENTIAL ASSEMBLING OF ACTIVE PHASED
ANTENNA ARRAY**

Step-by-step validation technique of constituent units of active phased antenna array at its sequential assembling is offered. The validation consists of electrical testing, electrical alignment and issue passports. In the beginning of every specifically-observed stage the checking of the final assembly units of the previous stage is provided. The final assembly units of the previous stage are the component units of the specifically-observed stage unit which should be tested. The mentioned checking of each final assembly unit of the previous stage is carried out in mode of in-phase and amplitude uniform excitations of its component units.

Keywords: active phased antenna array, receive-transmit unit, electrical testing and alignment.

А.А. ТЕРЗЯН, Г.С. СУКИАСЯН, Х.Г. ДАШЯН

К АДАПТАЦИИ АЛГОРИТМОВ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА

Исследовано влияние численных значений управляющих параметров алгоритмов случайного поиска на точность и время решения оптимизационных задач. Предложены алгоритмы адаптации управляющих параметров в зависимости от скорости изменения целевой функции. Показано, что соответствующая адаптация приводит как к улучшению точности решения задачи, так и к уменьшению количества обращений к модели.

Ключевые слова: оптимизационные задачи, случайный поиск, адаптация.

Случайный поиск, как некий аналог Природы, возникший лишь в 60-х годах XX столетия, сегодня стал мощным вычислительным методом для решения всевозможных экстремальных задач. Вместе с тем проведенные исследования [1-4] весьма убедительно свидетельствуют о значительной зависимости эффективности алгоритмов принятия решения, в том числе алгоритмов случайного поиска, от численных значений управляющих параметров, что, в свою очередь, подтверждает важность адаптации. Здесь речь идет о сборе информации в процессе решения задачи и на основе этой информации о динамическом (в ходе решения задачи) изменении численных значений управляющих параметров с целью приспособления алгоритма принятия решения к особенностям решаемой экстремальной задачи.

Заметим, что все работы, связанные с развитием адаптации алгоритмов принятия решения, в силу исключительной сложности проблемы основаны на эвристике. В настоящей работе авторы также не избежали эвристического подхода.

В алгоритмах случайного поиска управляющими параметрами являются объем накопления в текущей точке поиска, величина рабочего шага и параметры распределения вероятностей случайного шага.

Гиперсферический случайный поиск с пересчетом предусматривает в случае неудачного пробного шага продолжение случайных попыток (при максимальном числе m_{\max}) из исходной точки до первой удачной попытки и рабочий шаг в этом направлении. Этот алгоритм предусматривает также управление длиной шага перемещения h . Так, если количество попыток m превосходит заданное число μ , то шаг уменьшается K_h раз (не менее чем h_{\min}). В случае успешного продвижения, т.е. когда лучшая точка находится при числе попыток меньше μ , предусматривается увеличение шага (не более чем h_{\max}).

В качестве критерия останова принято минимальное значение (ξ) отклонения целевой функции $F(\bar{x})$ в $(t+1)$ -й и t -й итерациях, т.е.

$$\xi = \frac{F_t(\bar{x}) - F_{t+1}(\bar{x})}{F_t(\bar{x})}.$$

Таким образом, при данном алгоритме случайного поиска

$$\bar{x}_{t+1} = \bar{x}_t + \frac{\bar{\lambda}}{|\bar{\lambda}|} h_t$$

управление поиском имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } m \geq \mu, \text{ то } h_{t+1} = \frac{h_t}{K_h}; \\ \text{если } m < \mu, \text{ то } h_{t+1} = K_h h_t; \\ m_{\max} = \mu_{\max}; \\ h_{\max} \geq h_t \geq h_{\min}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где \bar{x}_t и \bar{x}_{t+1} - предыдущая и последующая точки многомерного пространства поиска; h_t - текущий шаг перемещения; $\bar{\lambda}$ - случайный вектор; K_h - коэффициент управления длиной шага; μ - заданное число случайных выборов; μ_{\max} - заданное максимальное число выборов.

Рассмотрим влияние численных значений управляющих параметров μ и K_h на процесс решения задачи. Численные исследования проведем на тестовой задаче оптимального проектирования синхронного явнополюсного генератора мощностью 20 кВт [4].

На рис. 1 показаны зависимости целевой функции $F(\bar{x})$ (объем генератора, $F(\bar{x}) = V \cdot 10^3 \text{ см}^3$) от количества обращений к модели N при различных значениях коэффициента управления шагом K_h (при $\mu = 15$). На процесс поиска немаловажное влияние оказывает также объем накопления μ .

На рис. 2 представлены результаты численных экспериментов по исследованию зависимости целевой функции $F(\bar{x})$ от количества обращений к модели при различных значениях μ (при $K_h = 1,2$).

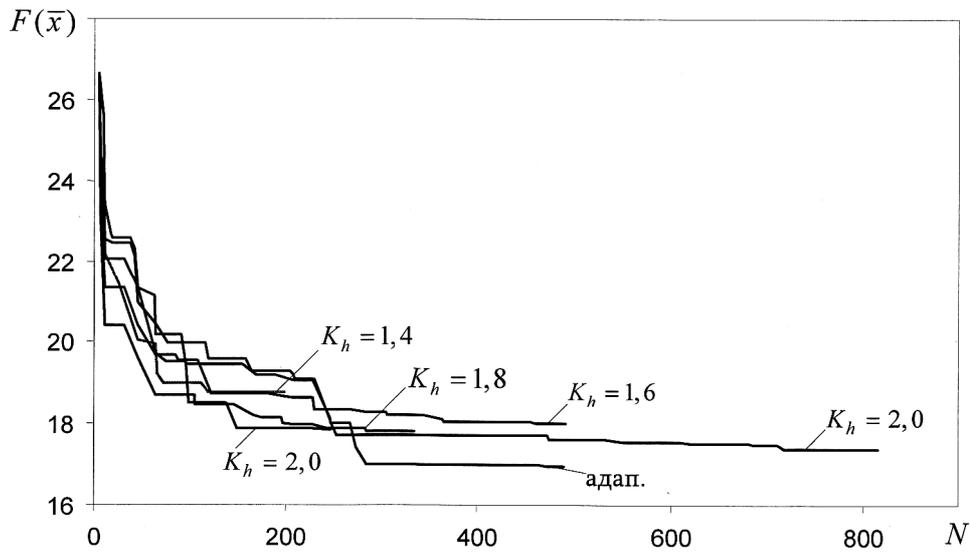


Рис. 1. Зависимости целевой функции $F(\bar{x})$ от количества обращений к модели N при различных значениях параметра

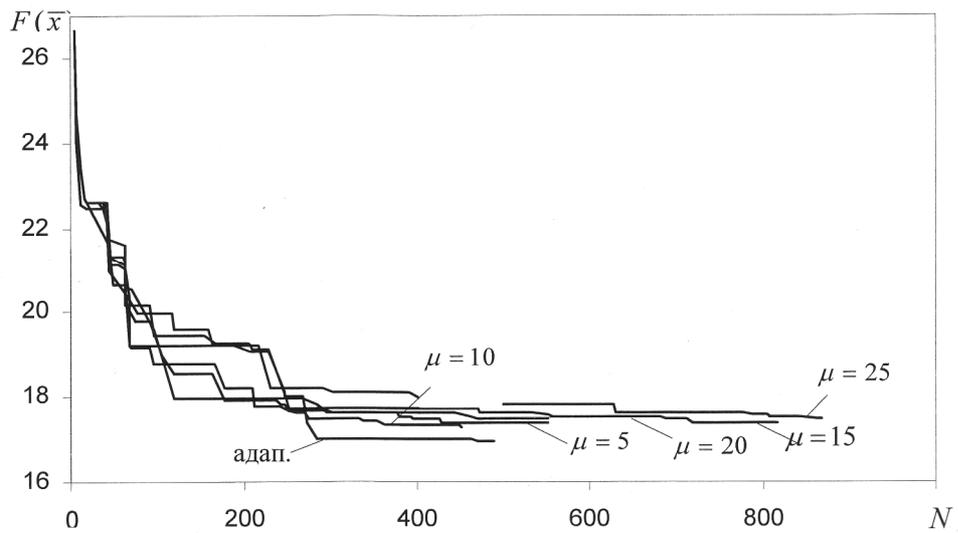


Рис. 2. Зависимости целевой функции $F(\bar{x})$ от количества обращений к модели N при различных значениях параметра управления μ в гиперсферическом случайном поиске. Кривая “адап” отражает процесс поиска с адаптивным управлением по μ и K_h

Представленные результаты свидетельствуют о значительном влиянии численных значений управляющих параметров μ и K_h на точность и время решения задачи.

Осуществим адаптацию параметра управления длиной шага K_h в зависимости от скорости изменения целевой функции. Представим эту зависимость в виде следующей функции:

$$K_h = 0,5e \left[1 + \frac{F_{t+1}(\bar{x}) - F_t(\bar{x})}{F_t(\bar{x})} \right], \quad (2)$$

где e – основание натурального логарифма.

Адаптации подвергнем также параметр управления μ . В алгоритме (1) вместо фиксированных значений μ представим динамически изменяемое μ_t в виде $\mu_{t+1} = \mu_t + K_m$, где

$$K_m = \ln(\xi)^{-1} = \ln \frac{F_t(\bar{x})}{F_t(\bar{x}) - F_{t+1}(\bar{x})}. \quad (3)$$

Таким образом, в предлагаемом алгоритме осуществляется гибкое управление как шагом поиска h_t , так и параметром μ в зависимости от скорости изменения целевой функции. Зависимость величины K_m от отклонения целевой функции ξ задается монотонно убывающей функцией так, чтобы K_m увеличивался, когда отклонение ξ уменьшается.

На рис. 1 и 2 сравнены зависимости целевой функции $F(\bar{x})$ от количества обращений к модели N при фиксированных значениях μ и K_h и при динамическом их изменении (кривые “адап”) по (2) и (3). Из рисунков видно, что адаптация параметров μ и h повышает качество поиска экстремума.

С учетом (2) и (3) алгоритм (1) преобразуется и принимает следующий вид:

$$\text{если } m_t \geq \mu_t, \text{ то } h_{t+1} = h_t K_h^{-1},$$

$$\text{если } m_t < \mu_t, \text{ то } h_{t+1} = h_t K_h,$$

$$\mu_{t+1} = \begin{cases} \mu_t + K_m, & \text{если } m_t \geq \mu_t, \\ \mu_t, & \text{если } m_t < \mu_t; \end{cases}$$

$$K_h = 0,5e \left[1 + \frac{F_{t+1}(\bar{x}) - F_t(\bar{x})}{F_t(\bar{x})} \right],$$

$$K_m = \ln \frac{F_t(\bar{x})}{F_t(\bar{x}) - F_{t+1}(\bar{x})},$$

$$h_{\max} \geq h_t \geq h_{\min}.$$

В связи с тем, что адаптация управляющего параметра типа (3) приводит в процессе поиска к увеличению значения μ , целесообразно начальное значение μ принимать небольшим в пределах 10...12. В этом случае достигается не только повышение точности, но и заметное уменьшение числа обращений к модели.

Алгоритмы случайного поиска, организующие целенаправленный поиск экстремума введением элемента случайности в виде источника возможностей, отличаются большим разнообразием.

Из этого разнообразия рассмотрим также алгоритм **наилучшей пробы**, при котором делается l случайных проб и по наилучшей выборке осуществляется рабочий шаг. Примем, что случайные выборки осуществляются в пределах гиперсферы, где радиус гиперсферы определяет длину h_t пробных шагов, а плотность распределения случайных точек предполагается равномерной на гиперсфере.

Как и в предыдущем случае, для управления длиной h_t шага перемещения используем минимальное значение ξ отклонения целевой функции $F(\bar{x})$ в $(t+1)$ -й и t -й итерациях. В случае успешного продвижения ($\xi \geq \Delta$, где Δ - заданное число) шаг увеличивается, в случае же $\xi < \Delta$ - уменьшается. Экстремальную точку будем считать найденной, если в процессе поиска минимальное значение ξ снизится до предельно заданного.

Итак, для решения экстремальной задачи управление рассмотренным алгоритмом случайного поиска имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \text{если } \xi \geq \Delta, \text{ то } h_{t+1} = h_t K_h^{-1}, \\ \text{если } \xi < \Delta, \text{ то } h_{t+1} = h_t K_h, \\ h_{\max} \geq h_t \geq h_{\min}. \end{cases} \quad (4)$$

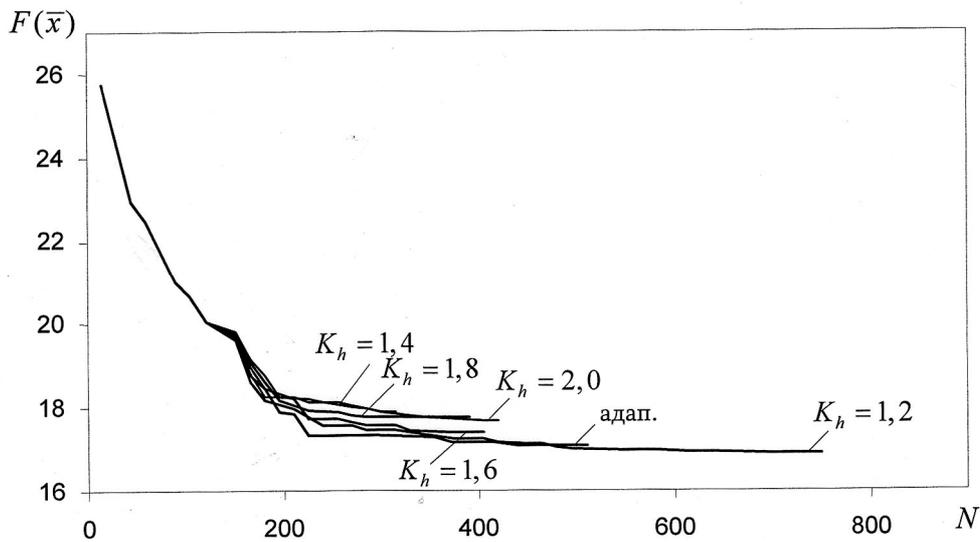
Обычно коэффициент управления длиной шага K_h принимается постоянным. На рис. 3 представлены результаты численного эксперимента по выявлению влияния различных значений K_h на процесс поиска экстремума (при $n = 15$).

Приведенные результаты убедительно свидетельствуют о значительном влиянии численных значений управляющего параметра K_h на процесс поиска при неопределенности самого выбора этого значения.

В обычно используемом алгоритме (4) количество проб l принимается постоянным, и, как правило, его выбор является неопределенным.

На рис.4 представлены результаты численных экспериментов по исследованию влияния количества проб l на процесс поиска экстремума (при $K_h = 1, 2$).

Как и в случае K_h , влияние значения n на процесс поиска заметно.



Error! Рис. 3. Зависимости целевой функции $F(\bar{x})$ от количества обращений к модели N при различных значениях параметра управления шагом K_h в случайном поиске с наилучшей пробой. Кривая “адап” отражает процесс поиска с адаптивным управлением по n и K_h

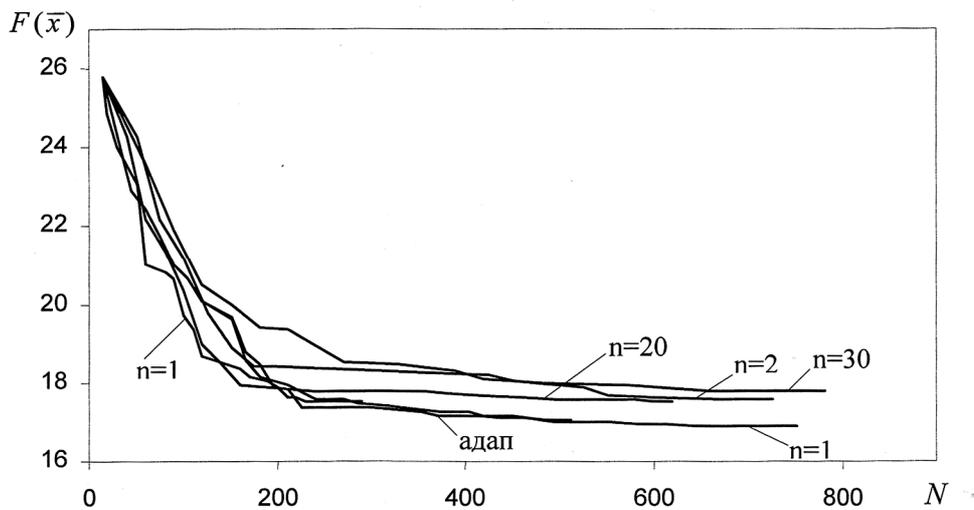


Рис. 4. Зависимости целевой функции $F(\bar{x})$ от количества обращений к модели N при различных значениях параметра управления n в случайном поиске с наилучшей пробой. Кривая “адап” отражает процесс поиска с адаптивным управлением по n и K_h

В настоящей работе предложено гибкое управление динамическим изменением величин K_h и n в зависимости от скорости изменения целевой функции. K_h предлагается изменять по (2), а в качестве регулирующей функции выборки n принимается

$$n_{t+1} = n_t + K_n ,$$

где

$$K_n = \ln(\xi)^{-1} + 1 = \ln \frac{F_t(\bar{x})}{F_t(\bar{x}) - F_{t+1}(\bar{x})} + 1.$$

На рис. 3 и 4 наряду с фиксированными значениями K_h и n представлены результаты поиска по предложенной схеме адаптации управляющих параметров K_h и n (кривые “адап”). Из рисунков видно, что динамическая адаптация приводит как к улучшению точности решения задачи, так и к уменьшению количества обращений к модели.

В заключение заметим, что адаптация алгоритмов принятия решения является весьма актуальной и вместе с тем далеко не решенной проблемой.

Попытка авторов настоящей работы по развитию этой проблемы основана на эмпирическом подходе, а численные эксперименты проведены на классе задач электрических машин. В дальнейшем, несомненно, требуется расширение как подходов, так и используемых моделей в численных экспериментах.

Тем не менее полученные результаты сужают неопределенность в выборе значений управляющих параметров и повышают качество принятия решений в задачах электромеханики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цыпкин Я.З.** Адаптация и обучение в автоматических системах. -М.: Наука, 1968.- 400с.
2. **Растринин Л.А., Рипа К.К., Тарасенко Г.С.** Адаптация случайного поиска. -Рига: Зинатне, 1978.-243с.
3. **Терзян А.А.** Автоматизированное проектирование электрических машин. - М.:Энергоатомиздат, 1983.- 256 с.
4. **Терзян А.А.** Алгоритмы принятия решений в электромеханике // Известия вузов. Электромеханика.- 2009. -№ 2. -С. 18-27.

ГИУА (П). Материал поступил в редакцию 16.04.2010.

Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ, Հ.Ս. ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ, Խ.Գ. ԴԱՇՅԱՆ

ՊԱՏԱՀԱԿԱՆ ՈՐՈՆՈՒՄՆԵՐԻ ԱԼԳՈՐԻԹՄՆԵՐԻ ԱՂԱՊՏԱՑՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Հետազոտված է պատահական որոնման ալգորիթմների ղեկավարող պարամետրերի թվային արժեքների ազդեցությունը լավարկման խնդիրների լուծման ճշտության և ժամանակի վրա: Առաջարկված են ղեկավարող պարամետրերի ադապտացման ալգորիթմներ, որոնք կախված են նպատակային ֆունկցիայի փոփոխման արագությունից: Ցույց է տված, որ համապատասխան ադապտացիան հանգեցնում է ինչպես խնդրի լուծման ճշտության լավացման, այնպես էլ մոդելին դիմումների թվի նվազման:

Առանցքային բառեր. լավարկման խնդիրներ, պատահական որոնում, ադապտացում:

H.A. TERZYAN, H.S. SUKIASYAN, KH.G. DASHYAN

ON ADAPTATION OF RANDOM SEARCHING ALGORITHMS

The numerical values influence of random searching algorithms controlling parameters on precision and solving time of optimization problems is investigated. The algorithms of random search adaptation of controlling parameters depending on variation rate of objective function are proposed. It is shown that the corresponding adaptation results in the growth of problem solving precision and reduction of model access quantity:

Keywords: optimization problems, random search, adaptation.

О.Н. ГАСПАРЯН, Р.М. ОВАКИМЯН, А.Р. ЧИЛИНГАРЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ
МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ КАНОНИЧЕСКИМИ
БАЗИСАМИ**

Дано распространение метода характеристических передаточных функций на задачу исследования точности нелинейных циркулянтных и антициркулянтных систем автоматического регулирования при стационарных случайных воздействиях. Получены канонические представления передаточных матриц нелинейных статистически линеаризованных систем указанных классов. Показано, что задача исследования статистической точности циркулянтных и антициркулянтных систем с произвольным числом каналов строго сводится к одномерной задаче и может быть решена стандартными методами классической теории регулирования. Приведен численный пример расчета статистической точности трехмерной антисимметричной системы.

Ключевые слова: многомерная система регулирования, метод характеристических передаточных функций, статистическая линеаризация нелинейностей, циркулянтная система, антициркулянтная система, канонический базис.

Введение. При исследовании статистической динамики нелинейных систем регулирования в инженерной практике наибольшее распространение получили приближенные методы, среди которых своей простотой и прикладной направленностью выделяется метод статистической линеаризации [1]. Данный метод основан на замене точной нелинейной зависимости между входными и выходными переменными нелинейного элемента приближенной линейной зависимостью, одинаково с нелинейной преобразующей математическое ожидание и дисперсию входного случайного сигнала. Это позволяет с достаточной для инженерных задач точностью учесть основные законы совместного прохождения полезных сигналов и случайных возмущений через нелинейные звенья. Подробное изложение вопросов применения метода статистической линеаризации при проектировании нелинейных систем, в том числе и систем с несколькими нелинейными элементами, дано в монографии [1] и др. Несмотря на это, методы исследования нелинейных многомерных систем автоматического регулирования (МСАР) при случайных воздействиях разработаны еще не с той степенью законченности, которая присуща теории нелинейных систем с одним входом и выходом (одномерных систем).

В этом отношении в ряде случаев весьма эффективными могут оказаться идеи метода характеристических передаточных функций (ХПФ) [2], чья применимость к

статистически линеаризованным МСАР является столь же правомочной, как и к любым другим линеаризованным МСАР. В работах [3, 4] метод ХПФ распространяется на задачу исследования статистической точности нелинейных МСАР общего вида, а также однотипных МСАР, т.е. многомерных систем с одинаковыми передаточными функциями отдельных каналов и жесткими взаимными связями между каналами.

В настоящей статье методы, описанные в [3, 4], обобщаются на особые классы МСАР, для которых введение понятий ХПФ и канонического базиса приводит к исключительно простым и наглядным результатам. Речь идет о так называемых циркулянтных и антициркулянтных МСАР (ЦМСАР и АМСАР), канонические базисы которых являются ортогональными и зависят только от размерности (числа каналов) N системы. К ЦМСАР и АМСАР относятся простые симметричные и антисимметричные МСАР, включая широко распространенные на практике двумерные системы с антисимметричными взаимными связями [2]. Как будет показано ниже, в случае ЦМСАР и АМСАР задача исследования статистической точности сводится к одномерной задаче независимо от числа каналов N и может быть решена обычными методами классической теории регулирования.

В дальнейшем, с целью сокращения объема статьи, мы ограничимся только случаем случайных сигналов с нулевыми математическими ожиданиями.

1. ХПФ и канонический базис статистически линеаризованных МСАР.

Рассмотрим N -мерную (т.е. имеющую N входов и N выходов) нелинейную устойчивую МСАР общего вида (рис. 1), считая для простоты все нелинейности $F_{ir}(x_r)$ нечетно-симметричными, безынерционными и однозначными.

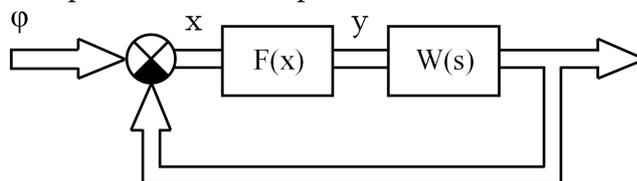


Рис. 1. Матричная структурная схема нелинейной МСАР

Пусть входной сигнал ϕ МСАР представляет собой стационарную случайную функцию времени с нулевым математическим ожиданием и нормальным распределением, заданную корреляционной матрицей $R_\phi(\tau)$ или матрицей спектральных плотностей $S_\phi(j\omega)$. Заменяем в соответствии с методом статистической линеаризации действительную зависимость между входом и выходом каждого нелинейного элемента $F_{ir}(x_r)$ приближенной линейной зависимостью [1]

$$F_{ir}(x_r) = k_{ir}x_r, \quad (1)$$

где k_{ir} - статистический коэффициент усиления нелинейности $F_{ir}(x_r)$.

Величина k_{ir} определяется из необходимого условия сохранения на выходе приближенной линейной зависимости (1) дисперсии выходной переменной нелинейного звена $F_{ir}(x_r)$. В общем случае коэффициенты k_{ir} зависят нелинейным образом от среднеквадратических отклонений σ_{x_r} входных переменных x_r , т.е. $k_{ir} = k_{ir}(\sigma_{x_r})$, и для типовых нелинейностей вычисляются по готовым формулам, имеющимся в литературе [1]. При этом обычно считается, что линейная часть $W(s)$ является достаточно узкополосной и обеспечивает нормализацию случайных процессов в замкнутом контуре.

С учетом (1) векторное уравнение динамики статистически линеаризованной МСАР на рис. 1 можно записать в виде

$$x = \Phi_x(s, \bar{\sigma}_x) \varphi = [I + W(s)K(\bar{\sigma}_x)]^{-1} \varphi, \quad (2)$$

где матрица $K(\bar{\sigma}_x)$ составлена из коэффициентов $k_{ir}(\sigma_{x_r})$, а вектор $\bar{\sigma}_x$ имеет компоненты σ_{x_r} . Назовем матрицу $Q(s, \bar{\sigma}_x) = W(s)K(\bar{\sigma}_x)$ передаточной матрицей разомкнутой статистически линеаризованной МСАР. Соответственно, записав каноническое представление этой матрицы при помощи преобразования подобия в виде [2-4]

$$Q(s, \bar{\sigma}_x) = C(s, \bar{\sigma}_x) \text{diag}\{q_i(s, \bar{\sigma}_x)\} C^{-1}(s, \bar{\sigma}_x), \quad (3)$$

будем называть функции $q_i(s, \bar{\sigma}_x)$ характеристическими передаточными функциями (формально ХПФ являются собственными значениями $Q(s, \bar{\sigma}_x)$), а базис, составленный из нормированных собственных векторов $c_i(s, \bar{\sigma}_x)$ матрицы $Q(s, \bar{\sigma}_x)$, - каноническим базисом статистически линеаризованной разомкнутой МСАР. Напомним, что в (3) через $C(s, \bar{\sigma}_x)$ обозначена модальная матрица, составленная из векторов $c_i(s, \bar{\sigma}_x)$, и считается, что все ХПФ $q_i(s, \bar{\sigma}_x)$ различны [2].

На основании (2) и (3) передаточную матрицу замкнутой статистически линеаризованной МСАР можно также представить в канонической форме

$$\Phi_x(s, \bar{\sigma}_x) = C(s, \bar{\sigma}_x) \text{diag}\left\{\frac{1}{1 + q_i(s, \bar{\sigma}_x)}\right\} C^{-1}(s, \bar{\sigma}_x). \quad (4)$$

Как видно из (3), (4), N-мерной статистически линеаризованной МСАР может быть поставлена в соответствие совокупность N одномерных характеристических систем, каждая из которых действует вдоль одной оси канонического базиса. ХПФ разомкнутых и замкнутых характеристических систем при этом связаны теми же зависимостями, что и обычные передаточные функции разомкнутых и замкнутых одномерных систем. Нелинейные свойства статистически линеаризованной МСАР проявляются в зависимости её канонического базиса и множества ХПФ от среднеквадратических отклонений σ_{x_r} (которые, в свою очередь, зависят от входного воздействия φ). Матрица ковариаций P_x вектора x при этом дается выражением [3]

$$P_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_x(j\omega, \bar{\sigma}_x) S_\varphi(j\omega) \Phi_x^*(j\omega, \bar{\sigma}_x) d\omega, \quad (5)$$

где * есть символ сопряжения (т.е. транспонирования и комплексного сопряжения) матрицы. Заметим, что диагональные элементы матрицы P_x равны дисперсиям $\sigma_{x_r}^2$ переменных x_r . Исследование статистической точности нелинейных МСАР общего вида и однотипных МСАР в [3, 4] основывалось на выражениях (2)-(5), и размерность задачи определялась числом каналов N .

2. Статистически линеаризованные ЦМСАР и АМСАР. Допустим, передаточная матрица $W(s)$ линейной части МСАР на рис.1 является циркулянтной, т.е. имеет вид

$$W(s) = \begin{pmatrix} w_0(s) & w_1(s) & w_2(s) & \dots & w_{N-1}(s) \\ w_{N-1}(s) & w_0(s) & w_1(s) & \dots & w_{N-2}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1(s) & w_2(s) & w_3(s) & \dots & w_0(s) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Воспользовавшись принятыми в (6) обозначениями $w_0(s)$, $w_i(s)$ ($i=1, 2, \dots, N-1$) элементов первой строки циркулянтной матрицы $W(s)$, последнюю можно записать в виде следующего матричного полинома [2]:

$$W(s) = w_0(s)I + \sum_{k=1}^{N-1} w_k(s) U^k, \quad (7)$$

где I - единичная матрица, а

$$U = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

есть ортогональная (т.е. $U^{-1} = U^T$, $\det U = +1$) матрица перестановок [2].

Исключительно важным свойством ЦМСАР является то, что их собственные значения (ХПФ) могут быть представлены в аналитической форме при любой размерности N , а канонические базисы, а вместе с ним и модальная матрица S , наследуются от матрицы перестановок U (8). Интересно и важно отметить, что канонические базисы ЦМСАР являются постоянными и совпадают между собой для всех систем одинаковой размерности.

Допустим теперь, что матрица нелинейностей $F(x)$ на рис.1 по структуре включения нелинейных элементов в МСАР также является циркулянтной, т.е. имеет вид

$$F(x) = \begin{pmatrix} F_0(x_1) & F_1(x_2) & F_2(x_3) & \dots & F_{N-1}(x_N) \\ F_{N-1}(x_1) & F_0(x_2) & F_1(x_3) & \dots & F_{N-2}(x_N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_1(x_1) & F_2(x_2) & F_3(x_3) & \dots & F_0(x_N) \end{pmatrix} \quad (9)$$

Тогда вместо (9) можно формально записать

$$F(x) = F_0(\cdot)I + \sum_{i=1}^{N-1} F_i(\cdot)U^i. \quad (10)$$

Формальность представления $F(x)$ в виде полинома (10) состоит в том, что $F(x)$ представляет собой функциональную матрицу, r -й столбец которой зависит нелинейным образом от r -й компоненты x_r вектора x .

На практике для ЦМСАР и АМСАР, как и для большинства МСАР вообще, весьма распространенной является ситуация, когда компоненты входного случайного вектора φ некоррелированы и имеют одинаковые спектральные плотности $S_\varphi(\omega)$. Более того, реальные входные сигналы при инженерных расчетах часто аппроксимируют статистически несвязанными, выбрав для них “наихудшую” спектральную плотность среди всех имеющихся. Поэтому в дальнейшем мы для простоты будем всегда полагать, что матрица спектральных плотностей входа $S_\varphi(j\omega)$ скалярна и равна $s_\varphi(\omega)I$.

Структурная симметрия взаимных связей между идентичными сепаратными каналами нелинейных ЦМСАР приводит к тому, что при подаче на их входы некоррелированных случайных функций с одинаковыми спектральными плотностями $S_\varphi(\omega)$ все дисперсии переменных x_r оказываются равными между собой. Действительно, допустим, что при $S_\varphi(j\omega) = s_\varphi(\omega)I$ все дисперсии на входах нелинейных элементов ЦМСАР одинаковы, т.е. $\sigma_{x_r}^2 = \sigma_x^2$. В этом случае матрица $K(\bar{\sigma}_x)$ статистических коэффициентов усиления зависит от единственной дисперсии σ_x^2 и является, в силу структурной циркулянтности матрицы нелинейностей $F(x)$ (9), циркулянтной. Это влечет за собой циркулянтность передаточных матриц (3) и (4) разомкнутой и замкнутой статистически линеаризованной ЦМСАР. Как следствие, эти передаточные матрицы могут быть представлены в каноническом виде при помощи преобразования подобия:

$$Q(s, \sigma_x) = C \text{diag}\{q_i(s, \sigma_x)\} C^{-1}, \quad (11)$$

$$\Phi_x(s, \sigma_x) = C \text{diag}\left\{ \frac{1}{1 + q_i(s, \sigma_x)} \right\} C^{-1}, \quad (12)$$

где $q_i(s, \sigma_x)$ есть ХПФ разомкнутой статистически линеаризованной ЦМСАР, а C - унитарная модальная матрица, составленная из ортогональных собственных векторов

матрицы перестановок U (8) [2]. Иными словами, канонический базис статистически линейаризованной ЦМСАР при $S_\varphi(j\omega) = s_\varphi(\omega)I$ является ортогональным и совпадает с каноническим базисом матрицы U . Подчеркнем также, что ХПФ $q_i(s, \sigma_x)$ при принятых выше условиях зависят нелинейным образом от единственной скалярной величины σ_x .

Эрмитова матрица спектральных плотностей вектора x :

$$S_x(j\omega, \sigma_x) = s_\varphi(\omega)\Phi_x(j\omega, \sigma_x)\Phi_x^*(j\omega, \sigma_x) \quad (13)$$

при этом также является циркулянтной. Кроме того, эта матрица принадлежит к классу положительно определенных матриц и совпадает со своей сопряженной [2, 5]. Напомним, что собственные значения эрмитовой циркулянтной матрицы, как и любой другой эрмитовой матрицы, всегда вещественны. Напомним также, что все диагональные элементы любой эрмитовой циркулянтной матрицы действительны (в силу эрмитовости) и равны между собой (в силу циркулянтности). Отсюда непосредственно приходим к выводу, что равны между собой и диагональные элементы матрицы спектральных плотностей $S_x(j\omega, \sigma_x)$ (13). Следовательно, интегралы в бесконечных пределах от диагональных элементов матрицы $S_x(j\omega, \sigma_x)$, дающие по определению дисперсии $\sigma_{x_r}^2$ переменных x_r , совпадают между собой, т.е. $\sigma_{x_r}^2 = \sigma_x^2$, что и требовалось доказать.

Воспользовавшись каноническим представлением (12) передаточной матрицы $\Phi_x(s, \sigma_x)$ ЦМСАР после замены в (12) s на $j\omega$ и учитывая, что для унитарной модальной матрицы C справедливо соотношение $C^{-1} = C^*$, из (13) после ряда несложных преобразований получим

$$S_x(j\omega, \sigma_x) = C \operatorname{diag} \left\{ \frac{s_\varphi(\omega)}{|1 + q_i(j\omega, \sigma_x)|^2} \right\} C^*, \quad (14)$$

откуда заключаем, что канонический базис положительно определенной эрмитовой матрицы $S_x(j\omega, \sigma_x)$ совпадает с каноническим базисом ЦМСАР, а собственные значения $\gamma_{xi}(j\omega, \sigma_x)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) матрицы $S_x(j\omega, \sigma_x)$ равны

$$\gamma_{xi}(j\omega, \sigma_x) = \frac{1}{|1 + q_i(j\omega, \sigma_x)|^2} s_\varphi(\omega). \quad (15)$$

Интегрируя обе части в (15) по ω в бесконечных пределах, приходим к каноническому представлению матрицы ковариаций P_x (10):

$$P_x = C \operatorname{diag} \{ D_i(\sigma_x) \} C^{-1}, \quad (16)$$

где $D_i(\sigma_x)$ - дисперсии "ошибок" одномерных характеристических систем, определяемые по формулам

$$D_i(\sigma_x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|1 + q_i(j\omega, \sigma_x)|^2} S_\varphi(\omega) d\omega, \quad (17)$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

Итак, при подаче на входы отдельных каналов нелинейной устойчивой ЦМСАР центрированных случайных функций со скалярной матрицей спектральных плотностей $S_\varphi(j\omega) = s_\varphi(\omega)I$ матрица ковариаций P_x вектора x имеет одинаковые диагональные элементы и связана с диагональной матрицей дисперсий $D_i(\sigma_x)$ (17) преобразованием подобия (16).

Из теории матриц известно, что след (сумма диагональных элементов) матриц инвариантен к преобразованию подобия [5]. Как следствие, след $\text{tr}\{P_x\}$ матрицы ковариаций P_x , равный в нашем случае $N \cdot \sigma_x^2$, в то же время равен сумме дисперсий $D_i(\sigma_x)$ одномерных характеристических систем, откуда окончательно имеем

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s_\varphi(\omega)}{|1 + q_i(j\omega, \sigma_x)|^2} d\omega \right\}. \quad (18)$$

Следовательно, одинаковые при $S_\varphi(j\omega) = s_\varphi(\omega)I$ дисперсии на входах нелинейных элементов статистически линеаризованной ЦМСАР равны среднему арифметическому значению дисперсий “ошибок” характеристических систем и находятся из скалярного нелинейного уравнения (18). Принимая во внимание существующие табличные интегралы для расчета дисперсий одномерных характеристических систем с комплексными коэффициентами [2], а также тот факт, что ХПФ ЦМСАР записываются в аналитической форме при любом числе N отдельных каналов, приходим к выводу, что задача сводится к стандартной одномерной задаче. Единственная неизвестная σ_x в (18) при этом определяется по классической схеме, описанной, например, в [1]. Иными словами, задача исследования статистической точности ЦМСАР произвольной размерности N , в принципе, оказывается не сложнее, чем в обычном случае систем с одним входом и выходом - возрастает лишь объем вычислений (учитывая возможности современных вычислительных средств, последний фактор представляется малозначачим).

Перейдем теперь к случаю АМСАР [2]. Основное отличие антициркулянтных матриц от циркулянтных состоит в том, что расположенные по обе стороны от главной диагонали симметричные элементы имеют противоположные знаки, т.е. каждая последующая строка получается из предыдущей сдвигом на один элемент вправо, причем последний элемент предыдущей строки становится первым элементом последующей строки с обратным знаком. Так, антициркулянтная передаточная матрица линейной части системы $W(s)$ на рис. 1 может быть записана в виде

$$W(s) = \begin{pmatrix} W_0(s) & W_1(s) & W_2(s) & \dots & W_{N-1}(s) \\ -W_{N-1}(s) & W_0(s) & W_1(s) & \dots & W_{N-2}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -W_1(s) & -W_2(s) & -W_3(s) & \dots & W_0(s) \end{pmatrix} \quad (19)$$

Если простейшей из циркулянтных матриц является матрица перестановок U (8) и любую циркулянтную матрицу можно выразить в виде полинома от U , то в случае антициркулянтных матриц аналогичную роль играет матрица перестановок с изменением знака последнего элемента, обозначаемая через U_- [2]. Эта матрица имеет вид

$$U_- = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

Соответственно, структурно антициркулянтная матрица нелинейностей АМСАР имеет вид

$$F(x) = \begin{pmatrix} F_0(x_1) & F_1(x_2) & F_2(x_3) & \dots & F_{N-1}(x_N) \\ -F_{N-1}(x_1) & F_0(x_2) & F_1(x_3) & \dots & F_{N-2}(x_N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -F_1(x_1) & -F_2(x_2) & -F_3(x_3) & \dots & F_0(x_N) \end{pmatrix} \quad (21)$$

Поскольку структурные и геометрические свойства ЦМСАР и АМСАР полностью аналогичны, то все приведенные выше рассуждения и результаты переносятся целиком на случай нелинейных статистически линеаризованных АМСАР. В частности, определение скалярной неизвестной σ_x на входах нелинейностей АМСАР осуществляется по выражению (18), где ХПФ $q_i(s, \sigma_x)$ находятся по соответствующим формулам для АМСАР [2].

Таким образом, в статье показано, что совместное применение метода ХПФ и метода статистической линеаризации позволяет математически строго свести задачу исследования статистической точности нелинейных циркулянтных и антициркулянтных МСАР к одномерной задаче при любой размерности (числе каналов) N системы, где единственной неизвестной является среднеквадратическое отклонение σ_x , определяемое из скалярного нелинейного уравнения (18).

Пример. Исследуем на основе изложенной методики статистическую точность простой антисимметричной МСАР (рис. 2), где нелинейности в отдельных каналах представляют собой одинаковые элементы насыщения с зоной линейности $\Delta = \pm 3$ и единичным усилением, а числовая матрица R имеет вид

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon & \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \varepsilon & -\frac{1}{\sqrt{3}} \sin \varepsilon \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} \sin \varepsilon & \cos \varepsilon & \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \varepsilon \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \varepsilon & -\frac{1}{\sqrt{3}} \sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix} \quad (22)$$

Параметры передаточных функций отдельных каналов системы примем равными $K = 10$, $T = 0,2$ с. Можно показать, что собственные значения матрицы R имеют вид

$$\lambda_1 = \cos \varepsilon, \quad \lambda_{2,3} = \cos \varepsilon \pm j \sin \varepsilon, \quad (23)$$

и при углах ε , меньших, чем значение запаса устойчивости по фазе отдельных каналов, автоколебания в МСАР на рис. 2 не возникают, т.е. система устойчива. В нашем случае эта величина равна $\varepsilon_k = 38,68^\circ$.

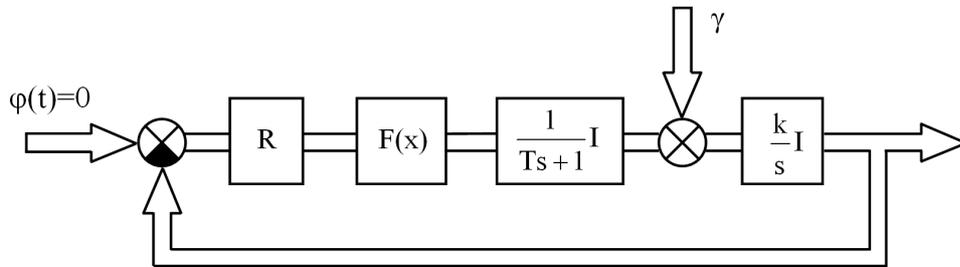


Рис. 2. Трехмерная простая антисимметричная система

Пусть компоненты вектора внешнего воздействия γ являются некоррелированными стационарными случайными функциями времени, имеющими одинаковую постоянную спектральную плотность N_0 (белый шум) и нулевые математические ожидания. При этих условиях одинаковые дисперсии σ_x на входах нелинейностей определяются уравнением (18).

Передаточная матрица $\Phi_x(s, \sigma_x)$ статистически линеаризованной системы, связывающая x с γ , имеет вид

$$\Phi_x(s, \sigma_x) = - \left[I + \frac{10k(\sigma_x)}{s(0,2s+1)} R \right]^{-1},$$

или в канонической форме:

$$\Phi_x(s, \sigma_x) = - C \text{diag} \left\{ \frac{10\lambda_i(0,2s+1)}{0,2s^2 + s + 10\lambda_i k(\sigma_x)} \right\} C^{-1}.$$

Отсюда следует, что передаточные функции $q_i(s, \sigma_x)$ одномерных характеристических систем с точностью до знака “минус” равны

$$q_i(s, \sigma_x) = \frac{10\lambda_i(0,2s+1)}{0,2s^2 + s + 10\lambda_i k(\sigma_x)} \quad (i=1, 2, 3),$$

где коэффициент статистической линеаризации $k(\sigma_x)$ дается известным выражением (см., например, [1]).

Для определения дисперсий $D_i(\sigma_x)$ характеристических систем при постоянной спектральной плотности N_0 случайных воздействий воспользуемся табличными интегралами, приведенными в [2]. Применение этих интегралов дает следующие аналитические выражения:

$$D_i(\sigma_x) = \frac{1}{2} \frac{|\lambda_i|^2 [1 + \operatorname{Re}\{\lambda_i\} K k(\sigma_x) \Gamma] N_0 K}{k(\sigma_x) [\operatorname{Re}\{\lambda_i\} - (\operatorname{Im}\{\lambda_i\})^2 K k(\sigma_x) \Gamma]} \quad (i=1, 2, 3). \quad (24)$$

На основании выражений (22) - (24) окончательно получим следующее скалярное нелинейное уравнение относительно неизвестного среднеквадратического отклонения σ_x :

$$\sigma_x^2 = \frac{5N_0 [1 + 2k(\sigma_x) \cos \varepsilon]}{3k(\sigma_x)} \left[\cos \varepsilon + \frac{2}{\cos \varepsilon - 2k(\sigma_x) (\sin \varepsilon)^2} \right]. \quad (25)$$

Уравнение (25) решалось при различных $\varepsilon = \text{const}$ ($0^\circ \leq \varepsilon \leq 50^\circ$) и изменении спектральной плотности N_0 от нуля до трех. Результаты решения в виде графиков даны на рис. 3. При $\varepsilon = 0^\circ$ матрица R переходит в единичную I , а выражение (25) принимает вид

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{5N_0 [1 + 2k(\sigma_x)]}{k(\sigma_x)}},$$

т.е. совпадает с выражением для среднеквадратического отклонения σ_x изолированного канала системы. При увеличении угла запасы устойчивости взаимосвязанной МСАР на рис. 2 уменьшаются, а среднеквадратические отклонения σ_x возрастают. На рис. 4 для сравнения показаны зависимости σ_x от N_0 для нелинейной МСАР на рис. 2 (сплошная линия) и той же системы без элементов насыщения (пунктирная линия) при $\varepsilon = 30^\circ$.

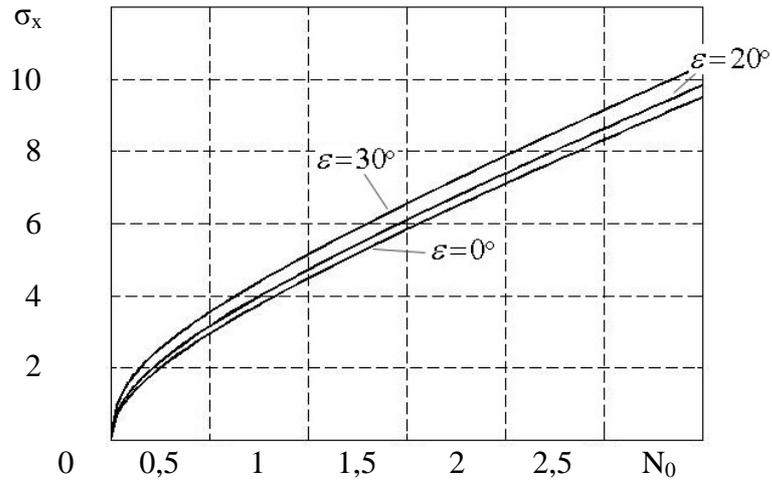


Рис. 3. Кривые зависимости среднеквадратического отклонения σ_x от N_0 при различных углах ϵ

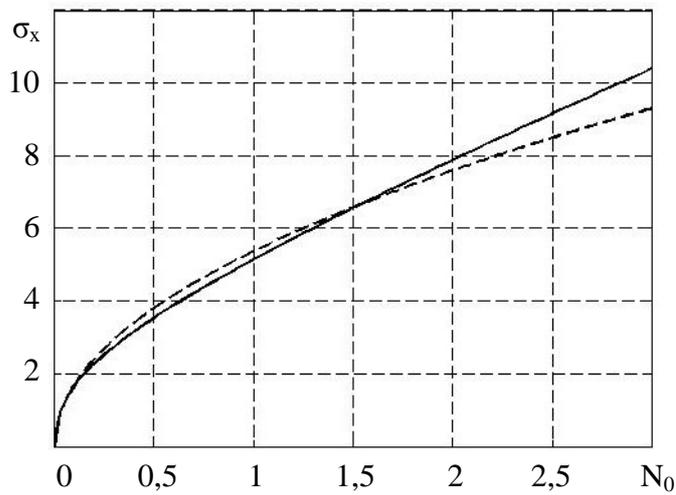


Рис. 4. Кривые зависимости σ_x от N_0 в нелинейной (сплошная линия) и линейной (пунктирная линия) МСАР при $\epsilon = 30^\circ$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пугачев В.С., Казаков И.Е., Евланов Л.Г. Основы статистической теории автоматических систем.-М.: Машиностроение, 1974.-400с.
2. **Gasparyan O.N.** Linear and Nonlinear Multivariable Feedback Control: A Classical Approach - John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Sussex, UK, 2008.
3. **Гаспарян О.Н., Чилингарян А.Р., Овакимян Р.М.** Исследование точности нелинейных многомерных систем автоматического регулирования при случайных воздействиях // Информационные Технологии и Управление.- 2008.- № 7.- С. 8-21.
4. **Гаспарян О.Н., Чилингарян А.Р., Овакимян Р.М.** О статистической динамике нелинейных одностипных систем многосвязного регулирования // Информационные Технологии и Управление.- 2008. - № 7.- С. 22-35.
5. **Shores T.S.** Applied Linear Algebra and Matrix Analysis.- Springer, 2007.- 393p
6. **Bitter R., Mohiudin T., Nawrocki M.** LabVIEW: Advanced Programming Techniques. 2-nd ed.- CRC Press, 2007.- 520 p.

ГИУА (П). Материал поступил в редакцию 16.04.2010.

Օ.Ն. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Ռ.Մ. ՀՈՎԱԿԻՄՅԱՆ, Ա.Ռ. ՉԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ

ՕՐԹՈԳՈՆԱԼ ԿԱՆՈՆԱԿԱՆ ԲԱԶԻՍԵՐՈՎ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԲԱԶՄԱՉԱՓ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ
ՎԻՃԱԿԱԳՐԱԿԱՆ ՃՇՏՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Բերված է բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիաների մեթոդի ընդհանրացումը ոչ գծային ցիրկուլյանտ և հակացիրկուլյանտ ավտոմատ կառավարման համակարգերի ճշտության հետազոտման համար՝ ստացիոնար պատահական ազդեցությունների դեպքում: Ստացվել են նշված դասերի վիճակագրական գծայնացված ոչ գծային համակարգերի փոխանցման մատրիցների կանոնական ներկայացումները: Ցույց է տրվել, որ կամայական թվով կապուղիներով ցիրկուլյանտ և հակացիրկուլյանտ համակարգերի վիճակագրական ճշտության հետազոտման խնդիրը բերվում է միաչափ խնդրին և կարող է լուծվել դասական կառավարման տեսության հայտնի մեթոդներով: Բերվել է եռաչափ հակասիմետրիկ համակարգի վիճակագրական ճշտության հաշվարկման թվային օրինակ:

Առանցքային բառեր. բազմաչափ կառավարման համակարգ, բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիաների մեթոդ, ոչ գծայնությունների ստատիստիկ գծայնացում, ցիրկուլյանտ համակարգ, հակացիրկուլյանտ համակարգ, վիճակագրական ճշտություն, փոխանցման ֆունկցիաների մատրից, կանոնական բազիս:

O.N. GASPARYAN, R.M. HOVAKIMYAN, A.R. CHILINGARYAN

INVESTIGATION OF STATISTICAL ACCURACY OF NONLINEAR MULTIVARIABLE
CONTROL SYSTEMS WITH ORTHOGONAL CANONICAL BASES

An extension of the characteristic transfer function method to the investigation problem of nonlinear circulant and anticirculant feedback control systems accuracy subjected to stationary stochastic signals is given. The canonical representations of transfer function matrices of statistically linearized nonlinear systems of the indicated classes are obtained. It is shown that the problem of statistical accuracy investigation of nonlinear circulant and anticirculant systems with an arbitrary number of channels is strictly reduced to a one-dimensional task and can be solved by means of standard methods of classical control theory. A numerical example of computing statistical accuracy of a three-dimensional anti-symmetrical control system is given.

Keywords: multivariable feedback control system, characteristic transfer function method, statistical linearization of nonlinearities, circulant system, anticirculant system, canonical basis.

Э.В. КАРСЛЯН, К.В. ПЕТРОСЯН

**МОДЕЛЬ ИНВЕСТИЦИЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ В
УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВЕННЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ**

На основе работ по реальным опционам и по принятию решений в условиях существенных неопределенностей моделируются инвестиции в научно-технические проекты (НТП). Неопределенности НТП описываются двумя стохастическими процессами, связанными с неопределенностями относительно требуемых инвестиционных расходов и неопределенностями относительно будущих доходов от инвестиции.

Ключевые слова: модель, инвестиция, научно-технический проект, неопределенность, оптимальное управление, стохастический процесс.

Введение. Анализ инвестиций в НТП представляет собой одну из самых трудных проблем инвестирования в условиях неопределенностей. Большинство инвестиций в НТП включают четыре особенности: во-первых, они содержат значительные неопределенности в расходах на осуществление проекта; во-вторых, будущие денежные потоки, т.е. доходы от реализации проекта, не определены; в-третьих, инвестиционные расходы являются частично или полностью необратимыми; в-четвертых, они могут быть отложены и оптимальное время (момент) инвестирования представляют собой важную задачу принятия решения.

Модели, рассматриваемые в данной статье, связаны с несколькими научными направлениями в литературе. С одной стороны, они следуют работам по применению теории реальных опционов к задачам оценки эффективности инвестиционных проектов (см. [1, 2] и библиографии к ним). С другой стороны, они связаны с литературой по принятию решений в условиях высоких неопределенностей (неопределенность Найта) (см. [3-5] и библиографии к ним).

1. Задача инвестирования в научно-технические проекты. Рассмотрим НТП, для реализации которого необходимо время (обычно это несколько лет, иногда это десять и более лет, например, для разработки нового лекарства), со случайным общим расходом на его завершение \tilde{K}_t и математическим ожиданием $K_t = M(\tilde{K}_t)$. Когда проект успешно завершится, форма (или НИИ) получит актив (например, новое программное обеспечение), стоимость которого V_t определяется как текущая

стоимость ожидаемых будущих чистых денежных потоков, дисконтированных по процентной ставке, скорректированной с учетом риска.

Предположим, что НТП характеризуется неопределенным денежным потоком V_t ,

который описывается геометрическим броуновским движением

$$dV_t = \mu V_t dt + \sigma V_t dw_t, \quad t \geq 0, \quad (1)$$

где dw_t - приращение винеровского процесса. Параметры стохастического процесса имеют естественную экономическую интерпретацию, а именно, коэффициент тенденции (сноса) μ представляет собой среднее значение мгновенного темпа изменения процесса, а коэффициент диффузии σ является среднеквадратичным отклонением этого мгновенного темпа изменения стоимости (волатильность). Поэтому на этот процесс можно смотреть как на возможную аппроксимацию соответствующих реальных процессов. Знак μ будет зависеть от специфики реального актива, рыночных условий, экономической среды и конкуренции. Существуют примеры НТП, в которых стоимость актива имеет положительную тенденцию $\mu > 0$ (например, фармацевтические продукты, связанные с другими медицинскими продуктами, употребление которых растет). Точно так же, существуют НТП, в которых $\mu < 0$ (например, когда возрастает международная конкуренция и рынок для разработанного актива (продукта) ссужается). Отрицательный коэффициент тенденции можно также трактовать как альтернативную стоимость задержки инвестиций.

Модель неопределенности расходов на завершение проекта основывается на подходе, предложенном в [2]. Предполагается, что ожидаемые расходы K_t следуют стохастическому дифференциальному уравнению вида

$$dK_t = -I_t dt + \beta (I_t K_t)^{1/2} dy_t + \delta K_t dt + \gamma K_t dz_t, \quad t \geq 0. \quad (2)$$

Это уравнение описывает управляемый стохастический процесс, где управление представляет собой уровень инвестиций I_t , а dy_t и dz_t являются приращениями некоррелированных винеровских процессов. Второй член в (2) характеризует техническую неопределенность, которая связана со сложностью создания или разработки актива (даже если все входные расходы известны точно) и, следовательно, может быть разрешена только инвестированием в проект. Выражение $\delta K_t dt$ описывает изменение в расходах на создание актива. Например, если расходы связаны с приобретением аппаратного обеспечения с микропроцессорами, то, как известно, цена микропроцессоров падает экспоненциально с течением времени, а именно, каждые 18 месяцев цены на некоторые микропроцессоры уменьшаются вдвое. Следовательно, продукт будет иметь значение $\delta = -\ln(2)/1,5 = -0,46$.

С учетом вышеизложенного можно считать, что фирма (или НИИ) принимает решение относительно инвестирования проекта на основе наблюдений за двумерным

стохастическим процессом $((V_t, K_t), t \geq 0)$. Предполагается, что заданную стоимость V_t актив приобретает к концу проекта ($t = \tilde{T}$), и оценка ценности (стоимости) инвестиционной возможности определяется следующим соотношением:

$$F(V_t, K_t) = \max_{I_t} M \left[V_t e^{-r\tilde{T}} - \int_0^{\tilde{T}} I_t e^{-r\tilde{T}} dt \right], \quad (3)$$

где M - математическое ожидание, \tilde{T} - случайная переменная длительности проекта; r - скорректированная с учетом риска дисконтная ставка; I_m - максимальный уровень инвестиций, причем $0 \leq I_t \leq I_m$.

2. Расширение модели. Теперь расширим нашу модель на еще более общий случай, а именно, вместо стохастических неопределенностей (1) и (2) будем рассматривать интервально-стохастические, когда экономический субъект точно не уверен относительно параметров случайных процессов, характеризующих будущие потоки доходов и расходов. Это означает, что лицо, принимающее решение, вместо единственной вероятностной меры P рассматривает множество вероятностных мер P . Иными словами, имеется некоторое множество (класс) допустимых, т.е. согласованных с имеющейся информацией, законов распределения вероятностей, которым принадлежит неизвестный закон распределения вероятностей эффекта данного проекта. Использование множества вероятностных мер P мотивируется работой [3], где показано, что традиционный подход выбора субъективных распределений вероятностей в отсутствие объективных распределений вероятностей входит в конфликт с проведенными экспериментами и наблюдениями за экономическими субъектами. В этом контексте использование множества распределений накладывает менее строгие ограничения на лица, принимающие решения.

Модель интервально-стохастической неопределенности в непрерывном времени, которую мы будем рассматривать далее, основывается на результатах работ [3-4].

Определим множество P как возможно абсолютно непрерывную по отношению к P , которую мы назовем исходной вероятностной мерой. Это множество может быть определено посредством так называемых генераторов плотностей $\theta = (\theta_t)$, т.е. класса стохастических процессов. Далее этот класс может быть использован, чтобы породить вероятностные меры Q^θ (вне исходной меры P) посредством определения плотностей вероятностных распределений. Более того, предположим, что генераторы плотностей $Q^\theta \in \Theta$ ограничиваются до области $\mathcal{K} = [-k, k]$, где k - ограниченное вещественное число. Это определение позволяет множество P преобразовать в постоянный интервал неопределенности вокруг исходной меры P , тем самым упрощая решение динамических оптимизационных задач.

Рассмотрим полное вероятностное пространство (Ω, \mathcal{F}, P) , снабженное фильтрацией $\mathcal{F} = \{\mathcal{F}_t, t \geq 0\}$, представляющей неубывающее непрерывное справа семейство (полных) σ -алгебр \mathcal{F} . Пусть w_t - стандартное броуновское движение (винеровский процесс), определенное на этом вероятностном пространстве. Из теоремы Гирсанова [6] следует, что стохастический процесс w_t^θ , $0 \leq t < \infty$, определяемый как

$$w_t^\theta = w_t + \int_0^t \theta_s ds, \quad \forall t \geq 0, \quad \forall \theta \in \Theta, \quad (4)$$

представляет собой стандартное броуновское движение по отношению с \mathcal{F} на $(\Omega, \mathcal{F}, Q^\theta)$. Заметим, что (4) эквивалентно уравнению

$$dw_t^\theta = dw_t + \theta_t dt \quad \text{или} \quad dw_t = dw_t^\theta - \theta_t dt. \quad (5)$$

Используем этот результат, чтобы обобщить стохастические процессы (1) и (2), а именно:

$$\begin{aligned} dV_t &= \mu V_t dt + \sigma V_t dw_t = \mu V_t dt + \sigma V_t (dw_t^\theta - \theta_t^\omega dt) = \\ &= (\mu - \sigma \theta_t^\omega) V_t dt + \sigma V_t dw_t^\theta, \quad \forall \theta_t^\omega \in \Theta^\omega. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогично для процесса (2), т.е.

$$\begin{aligned} dK_t &= \left(-I_t - \beta \theta_t^y (I_t K_t)^{1/2} \right) dt + \beta (I_t K_t)^{1/2} d\mathcal{J}_t^\theta + \\ &+ (\delta - \gamma \theta_t^z) K_t dt + \gamma K_t dz_t^\theta. \end{aligned} \quad (7)$$

Как видно, обобщенные процессы (6) и (7) отличны от исходных (1) и (2) только коэффициентами тенденций, а именно:

$$(\mu - \sigma \theta_t^\omega), \quad \theta_t^\omega \in \Theta^\omega, \quad (8)$$

$$\left(-I_t - \beta \theta_t^y (I_t K_t)^{1/2} \right), \quad \theta_t^y \in \Theta^y \quad (9)$$

$$(\delta - \gamma \theta_t^z) K_t, \quad \theta_t^z \in \Theta^z. \quad (10)$$

В условиях неопределенностей, характеризуемых посредством Θ^w, Θ^y и Θ^z , лицо, принимающее решение, рассматривает все стохастические дифференциальные уравнения (6) и (7) с изменяющимися параметрами $\theta^w \in \Theta^w, \theta^y \in \Theta^y$ и $\theta^z \in \Theta^z$. Рассмотрим, к примеру, уравнение (6). Используя лемму Ито [6] к $\ln V_t$ и рассматривая Q^θ как вероятностную меру, можно показать, что (7) формально имеет решение следующего вида:

$$V_t = V_0 \exp \left[\left(\mu - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) t - \sigma \int_0^t \theta_s^w ds + \sigma w_t^\theta \right]. \quad (11)$$

Из (11) ясно видно, что единственный стохастический процесс V_t имеет много различных “интерпретаций”, причем каждая из них соответствует отдельной вероятностной мере, эквивалентной мере P .

3. Уравнение Беллмана оптимального управления. Используя лемму Ито, запишем выражение для дифференциала - ценности инвестиционной возможности $dF(V_t, K_t)$:

$$\begin{aligned} dF(V_t, K_t) = & \frac{\partial F(V_t, K_t)}{\partial V_t} dV_t + \frac{\partial F(V_t, K_t)}{\partial K_t} dK_t + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F(V_t, K_t)}{\partial V_t^2} dV_t^2 + \\ & + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F(V_t, K_t)}{\partial K_t^2} dK_t^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F(V_t, K_t)}{\partial V_t \partial K_t} dV_t dK_t. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя (12) и уравнения (6) и (7) в соответствующее уравнение динамического программирования, получим следующее эллиптическое дифференциальное уравнение второго порядка (уравнение Беллмана) для получения $F(V_t, K_t)$:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \sigma^2 V_t^2 \frac{\partial^2 F(V_t, K_t)}{\partial V_t^2} + (\mu - \sigma \theta^w) V_t \frac{\partial F(V_t, K_t)}{\partial V_t} - r F(V_t, K_t) + \\ & + \frac{1}{2} \beta^2 I_t K_t \frac{\partial^2 F(V_t, K_t)}{\partial K_t^2} + (-I_t + \delta K_t - \beta \theta^y (I_t K_t)^{\frac{1}{2}} - \gamma \theta^z K_t) \frac{\partial F(V_t, K_t)}{\partial K_t} - I_t = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

с граничными условиями:

$$F(V_t, 0) = V_t, \quad (14)$$

$$F(0, K_t) = 0, \quad (15)$$

$$\lim_{K_t \rightarrow \infty} F(V_t, K_t) = 0. \quad (16)$$

Значения параметров $\hat{\theta}_t^w$, $\hat{\theta}_t^y$ и $\hat{\theta}_t^z$ выбираются с учетом наихудшего случая.

Уравнение (13) не имеет аналитического решения, поэтому рассмотрим специальный случай, когда отсутствует неопределенность в инвестиционных расходах. В этом случае ценность инвестиционной возможности описывается обыкновенным дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{1}{2} \sigma^2 V_t^2 \frac{d^2 F(V_t)}{dV_t^2} + (\mu - \sigma \hat{\theta}^w) V_t \frac{dF(V_t)}{dV_t} - rF(V_t) = 0. \quad (17)$$

Кроме этого, $F(V_t)$ должна удовлетворять следующим граничным условиям:

$$F(0) = 0, \quad (18)$$

$$F(V^*) = V^* - I, \quad (19)$$

$$\frac{dF(V^*)}{dV_t} = 1. \quad (20)$$

Условие (18) показывает, что если V_t стремится к нулю, то она будет оставаться на нуле (это подразумевается сущностью процесса (6)), поэтому инвестиционная возможность не будет иметь никакой ценности. V^* представляет собой цену актива, при которой инвестирование является оптимальным. Условие (19) указывает на тот факт, что при инвестировании фирма получает чистый доход $V^* - I$, а условие (20) является одним из вариантов “гладкого склеивания” [1, 2].

Чтобы решить обыкновенное дифференциальное уравнение (17), запишем его характеристическое уравнение

$$\frac{1}{2} \sigma^2 \lambda(\lambda - 1) + (\mu - \sigma \hat{\theta}^w) \lambda - r = 0. \quad (21)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\lambda_{1,2} = \frac{\left\{ (\mu - \sigma \hat{\theta}^w) - \frac{1}{2} \sigma^2 \right\} \pm \sqrt{\left\{ (\mu - \sigma \hat{\theta}^w) - \frac{1}{2} \sigma^2 \right\}^2 + 2r\sigma^2}}{\sigma^2}. \quad (22)$$

При $r > \mu$ нетрудно показать, что $\lambda_1 > 1$, а $\lambda_2 < 0$. Далее можно легко проверить, что как V^{λ_1} , так и V^{λ_2} решают (17) и что Вронсиан функций $V_t^{\lambda_1}$ и $V_t^{\lambda_2}$ является ненулевым для любого $V_t > 0$. (Здесь Вронсиан двух функций f_1 и f_2 : $W(f_1, f_2) = f_1 f_2' - f_1' f_2$ и $W(V_t^{\lambda_1}, V_t^{\lambda_2}) = (\lambda_2 - \lambda_1) V_t^{\lambda_1 + \lambda_2 - 1}$). Следовательно, любое решение (17) может быть выражено единственным образом как линейная комбинация $V_t^{\lambda_1}$ и $V_t^{\lambda_2}$, а именно:

$$F(V_t) = aV_t^{\lambda_1} + bV_t^{\lambda_2}, \quad (23)$$

где a и b - некоторые вещественные постоянные, которые необходимо определить [7]. И, наоборот, очевидно, что любая функция вида (23) является решением уравнения (17). Это означает, что (23) исчерпывает все решения (17).

Теперь перейдем к граничным условиям. Отрицательность λ_2 и (18) влечет $b = 0$ и, следовательно,

$$F(V_t) = aV_t^{\lambda_1}, \quad (24)$$

где постоянная a также должна быть определена.

Далее из (24), (19) и (20) следует, что

$$a(V^*)^{\lambda_1} = V^* - I \quad \text{и} \quad \lambda_1 a (V^*)^{\lambda_1 - 1} = 1. \quad (25)$$

Решая эти два уравнения, получим

$$F(V_t) = \begin{cases} \left(\frac{I}{\lambda_1 - 1} \right)^{1 - \lambda_1} \lambda_1^{-\lambda_1} V_t^{\lambda_1}, & \text{если } V_t < V^*, \\ V_t - I, & \text{если } V_t \geq V^*, \end{cases} \quad (26)$$

где

$$V_t = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - 1} I, \quad (27)$$

$$a = \frac{V^* - I}{(V^*)^{\lambda_1}} = \frac{(\lambda_1 - 1)^{\lambda_1 - 1}}{(\lambda_1)^{\lambda_1} \cdot I^{\lambda_1 - 1}}. \quad (28)$$

Таким образом, соотношения (26)-(28) дают ценность (стоимость) инвестиционной возможности и оптимальную стратегию инвестирования, т.е. критическое значение стоимости актива, выше которой инвестиция является оптимальной. Здесь необходимо сделать важное замечание, а именно, так как $\lambda_1 > 0$ и $\lambda_1/(\lambda_1 - 1) > 0$, то из (27) следует неравенство $V^* > I$. Это означает, что наличие неопределенности и необратимости инвестиций делает стандартное правило чистой текущей стоимости (NPV) некорректным.

Рассмотрим теперь численный пример. Пусть $I = 1$, $r = 0,2$, $\mu = 0,2$, $\hat{\theta} = 0$, $\sigma = 0,1, 0,2, 0,4, 0,6$.

На рисунке приведены графики решения уравнения (17).

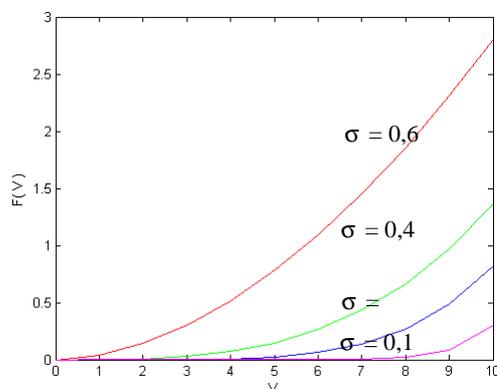


Рис. Оценка инвестиционной возможности

Заметим, что $F(V)$ увеличивается при увеличении σ , при этом также увеличивается критическое значение V^* . Таким образом, неопределенность увеличивает ценность инвестиционной возможности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dixit A.K., Pindyck R.S.** Investment under Uncertainty. Princeton: Princeton University Press. – 1 994. -476.
2. **Pindick R.S.** Investment of Uncertain Cost // Journal of Financial Economics. -1993. -V.34. -P.53-76.
3. **Chen Z., Epstein L.** Ambiguity, Risk and Asset Returns in Continuous Time // Econometrica. - 2002. -V.70. -P.1403-1443.
4. **Gilba I., Schmeider D.** Maximin Expected Utility with Non-Unique Prior //Journal of Mathematical Economics. -1989. -V.18. -P.141-153.
5. **Knight F. Risk, Uncertainty, and Profit.** New York: Cosimo Classics. -2006. -P.400.
6. **Булинский А.В., Ширяев А.Н.** Теория случайных процессов. -М.: Физматлит, 2003. – 432с.
7. **Камке Э.** Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. - М.: Наука, 1971. – 576 с.

Է.Վ. ՂԱՐՍԼՅԱՆ, Կ.Վ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ԷԱԿԱՆ ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ԳԻՏԱՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՆԱԽԱԳԾԵՐՈՒՄ ՆԵՐԴՐՈՒՄՆԵՐԻ ՍՈՂԵԼԸ

Գիտատեխնիկական նախագծերում (ԳՏՆ) ներդրումները մոդելավորվում են իրական օպցիոնների և էական անորոշությունների պայմաններում որոշումների կայացման վերաբերյալ աշխատությունների հիման վրա: ԳՏՆ-ի անորոշությունը նկարագրվում է երկու ստոխաստիկ պրոցեսներով, որոնք կապված են պահանջվող ներդրումային ծախսերի անորոշությունների և այդ ներդրումից ապագայում սպասվող եկամուտների վերաբերյալ անորոշության հետ:

Առանցքային բառեր. մոդել, ներդրում, գիտատեխնիկական նախագիծ, անորոշություն, օպտիմալ կառավարում, ստոխաստիկ պրոցես:

E.V. KARSLIAN, K.V. PETROSYAN

RESEARCH AND DEVELOPMENT INVESTMENTS MODEL UNDER SIGNIFICANT UNCERTAINTIES

Investments in research and development (R&D) using the works on real option approach to investment and decision making under significant uncertainty are modeled. The uncertainties of R&D project are summarized into two stochastic processes relating to uncertainties about the future payoffs from the investment. The difference between risk and uncertainty is shown and the influence on software investment decisions is studied.

Keywords: model, investment, research and development project, uncertainty, optimal control, stochastic process.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ Ս.Տ., ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ Կ.Գ., ԱՐՁՈՒՄՄԱՆՅԱՆ Կ.Ս., ՄԱՐԳՍՅԱՆ ՅՈՒ.Լ.
 ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՏՈՐՆԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ
 ԷԼԵԿՏՐՈՆԱԿԱՏՐԱԿՏԱԲԵՐՆԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՍԲ 111

ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ Է.Ա., ՍՏԱԿՅԱՆ Մ.Գ.
 ԼԻՍԵՆՆԵՐԻ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄՆԵՐԻ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ ՄԻԱԳՈՐԾՈՆ
 ՑՐԿԱԾՔԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄԸ ԵՎ
 ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԱՊԱՀՈՎՈՒՄԸ 122

ՄԱՀՐԱԴՅԱՆ Ա.Ի.
 ՏԱՐԲԵՐ ՊՈՂՊԱՏՆԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԸՆԹԱՑՔՈՒՄ ԿՏՐՄԱՆ ԼԱՎԱՐԿՎԱԾ
 ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ՝ ԿԱԽՎԱԾ ՀԵՌԱՅՎՈՂ ՏԱՇԵՂԻ
 ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻՑ 127

ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Հ.Ա.
 ՆՅՈՒՏՈՆ-ԷՅԼԵՐԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ ՄԵԹՈԴԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՌԱՋ-
 ԳԱԿԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐՈՒՄ 133

ԱՂԲԱԼՅԱՆ Մ.Գ., ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Գ.Խ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Ա., ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ա.Ս.
 ՇՓՄԱՆ ԵՎ ՄԱՇՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՈՒՄ ԵՐԿՐՈՐԴԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ
 ԱՌԱՋԱՑՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄԸ 139

ԱՍԻՂՋԱՆՅԱՆ Ա.Ս., ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ա.Ա., ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ Ո.Զ.
 ԱԷԿ-Ի ԱՌԱՋԻՆ ԿՈՆՏՈՒՐԻՑ ՋԵՐՄԱԿՐԻ ԶՓՈԽՀԱՏՈՒՑՎՈՂ
 ԱՐՏԱՀՈՍՔՈՎ ՊԱՅՄԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ԾԱՆՐ ՎԹԱՐՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ
 ՑԱՅՏԱԶՐՄՈՒՂԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ 148
 ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ...

ԹԱԹԻԿՅԱՆ Տ.Ս., ՄԻՆԱՍՅԱՆ Կ.Ս.
 ԲՆԱՊԱՀՊԱՆԱԿԱՆ ԳՈՐԾՈՆՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՈՒՄԸ ՋԷԿ-ԵՐԻ և ԱԷԿ-ԵՐԻ
 ՇՈԳԵՏՈՒՐԲԻՆՆԵՐԻ ՀՈՎԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ
 ԺԱՄԱՆԱԿ ... 156

ՄԱՖԱՐՅԱՆ Վ.Ս., ԳԱԼՍՅԱՆ Գ.Հ.
 ՄԻՆՔՐՈՆ ՄԵՔԵՆԱՅԻ ԱՆՑՈՒՄԱՅԻՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ
 ՄՈՂԵԼԸ ԲՆԱԿԱՆ ՏԵՍՔՈՎ 161

**ՄԵԼԻՔՅԱՆ Վ.Շ., ՄԻՐՁՈՅԱՆ Դ.Լ., ԽԱԶՏԱՐՅԱՆ Ա.Ն., ՄԱՐԳՍՅԱՆ Ա.Գ.,
 ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Դ.Խ., ՄՈՆՍՍՅԵԼՅԱՆ Է.Հ.**
 ՄՕԿ ՏՐԱՆՋԻՍՏՈՐՆԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՍԲ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ
 ՇԵՂՈՒՄՆԵՐԻ ԳՐԱՆՑՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿ 170

ՄԱՐԿՈՍՅԱՆ Մ.Վ., ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Վ.Հ., ԷՅՐԱՍՏՅԱՆ Մ.Գ.
 ԱԿՏԻՎ ՓՈՒԼԱՎՈՐՎԱԾ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ՓՈՒԼ ԱՌ ՓՈՒԼ
 ԱՏԵՍՏԱՎՈՐՈՒՄՆ ՀԱԶՈՐԴԱԿԱՆ ՀԱՎԱՔՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ 181

ԹԵՐԶՅԱՆ Հ.Ա., ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ Հ.Ս., ԴԱՇՅԱՆ Խ.Գ.
 ՊԱՏԱՀԱԿԱՆ ՈՐՈՆՈՒՄՆԵՐԻ ԱԼԳՈՐԻԹՄՆԵՐԻ ԱԴԱՊՏԱՑՄԱՆ ՄԱՍԻՆ .. 192

ԳԱՄՊԱՐՅԱՆ Օ.Ն., ՀՈՎԱԿԻՍՅԱՆ Ռ.Մ., ԶԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ Ա.Ռ.
 ՕՐԹՈԳՈՆԱԼ ԿԱՆՈՆԱԿԱՆ ԲԱԶԻՄՆԵՐՈՎ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԲԱԶՄԱԶՈՓ
 ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՎԻՃԱԿԱԳՐԱԿԱՆ ՃՇՏՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ 200

ՂԱՐՍԼՅԱՆ Է.Վ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Կ.Վ.
 ԷԱԿԱՆ ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ԳԻՏԱՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ
 ՆԱԽԱԳԾԵՐՈՒՄ ՆԵՐԴՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄՈՂԵԼԸ 213

СОДЕРЖАНИЕ

МЕЛКОНЯН С.Т., СТЕПАНЯН К.Г., АРЗУМАНЯН К.С., САРКИСЯН Ю.Л. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРАМИ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ	111
МАРГАРЯН Э.А., СТАКЯН М.Г. РАСЧЕТНЫЙ АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОДНОФАКТОРНОГО ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ВАЛОВ	122
САГРАДЯН А. И. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ СНИМАЕМОГО СЛОЯ	127
ГЕВОРКЯН Г.А. ПРИЛОЖЕНИЕ ОБОБЩЁННОГО МЕТОДА НЬЮТОНА-ЭЙЛЕРА К ЗАДАЧАМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ УПРУГИХ МЕХАНИЗМОВ ..	133
АГБАЛЯН С.Г., КАРАПЕТАН Г.Х., ПЕТРОСЯН А.А., АГБАЛЯН А.С. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА	139
АМИРДЖАНИЯН А.М., ГЕВОРГЯН А.А., МАРУХЯН В.З. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СПРИНКЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ С НЕКОМПЕНСИРУЕМОЙ ТЕЧЬЮ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ИЗ ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС	148
ТАТИКЯН Т.С., МИНАСЯН К.С. УЧЕТ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ВЫБОРЕ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН ТЭС И АЭС	156
САФАРЯН В.С., ГАЛСТЯН Г.Г. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ В НАТУРАЛЬНОМ ВИДЕ	161
МЕЛИКЯН В.Ш., МИРЗОЯН Д.Л., ХАЧАТРИАН А.Н., САРГСЯН А.Г., ГРИГОРЯН Д.Х., МУСАЕЛЯН Э. О. МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗБРОСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОП ТРАНЗИСТОРОВ	170
МАРКОСЯН М.В., АВЕТИСЯН В.Г., ЭЙРАМДЖЯН С.Г. ПОЭТАПНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СБОРКЕ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ	181
ТЕРЗЯН А.А., СУКИАСЯН Г.С., ДАШЯН Х.Г. К АДАПТАЦИИ АЛГОРИТМОВ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА	192
ГАСПАРЯН О.Н., ОВАКИМЯН Р.М., ЧИЛИНГАРЯН А.Р. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ КАНОНИЧЕСКИМИ БАЗИСАМИ	200
КАРСЛЯН Э.В., ПЕТРОСЯН К.В. МОДЕЛЬ ИНВЕСТИЦИЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ В УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВЕННЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ	213

CONTENTS

MELKONYAN S.T., STEPANYAN K.G., ARZUMANYAN K.S., SARKISSYAN Y.L.	
OPTIMAL CONTROL OF MANIPULATORS TAKING INTO ACCOUNT CHARACTERISTICS OF ELECTRIC DRIVES	111
MARGARYAN E.A., STAKYAN M.G.	
DESIGN ALGORITHM AND SOFTWARE OF A SINGLE-FACTOR DISPERSION ANALYSIS OF SHAFT TEST RESULTS	122
SAHRADYAN A.E.	
CUTTING OPTIMUM SPEED INVESTIGATION FOR MACHINING STEELS DEPENDING ON DEFORMATION DEGREE OF LAYER REMOVING BY CUTTERS MADE OF HIGH-CUTTING STEELS AND ALLOYS	127
GEVORGYAN H.A.	
AN APPLICATION OF THE GENERALIZED NEWTON-EULER METHOD IN THE OPTIMAL CONTROL PROBLEMS OF FLEXIBLE MECHANISMS	133
AGHBALYAN S.G., KARAPETYAN G.X., PETROSYAN, A.A.	
AGHBALYAN A.S.	
SECONDARY STRUCTURE FORMATION MECHANISM IN THE COURSE OF THE FRICTION AND DETERIORATION	139
AMIRDJANYAN A.M., GEVORGYAN A.A., MARUKHYAN V.Z.	
ESTIMATION OF SPRAY SYSTEM EFFICIENCY IN CASE OF LOSS IN COOLANT SEVERE ACCIDENT CONDITION	148
TATIKYAN T.S., MINASYAN K.S.	
ENVIRONMENTAL FACTORS ACCOUNTING DURING TPP's AND NPP's STEAM TURBINE COOLING SYSTEM SELECTION	156
SAFARYAN V.S., GALSTYAN G.H.	
MATHEMATICAL MODEL OF TRANSIENT PROCESS OF THE SYNCHRONOUS MACHINE IN A NATURAL KIND	161
MELIKYAN V. SH., MIRZOYAN D. L., KHACHATRYAN A. N., SARGSYAN A. G., GRIGORYAN D.Kh., MUSAYELYAN E.H.	
PROCESS VARIATION DETECTION METHOD USING MOS TRANSISTORS	170
MARKOSYAN M.V., AVETISYAN V.H., EYRAMJYAN S.G.	
STEP-BY-STEP VALIDATION AT SEQUENTIAL ASSEMBLING OF ACTIVE PHASED ANTENNA ARRAY	181
TERZIAN H.A., SUKIASYAN H.S., DASHYAN KH.G.	
ON ADAPTATION OF RANDOM SEARCHING ALGORITHMS	192
GASPARYAN O.N., HOVAKIMYAN R.M., CHILINGARYAN A.R.	
INVESTIGATION OF STATISTICAL ACCURACY OF NONLINEAR MULTIVARIABLE CONTROL SYSTEMS WITH ORTHOGONAL CANONICAL BASES	200
KARSLIAN E.V., PETROSYAN K.V.	
RESEARCH AND DEVELOPMENT INVESTMENTS MODEL UNDER SIGNIFICANT UNCERTAINTIES	213