

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԽՐԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈՒՆԴԻՒՄ

Այո՛ց Շ. Տ., Ալեխանյան Վ. Վ., Նիկողոսյան Ի. Վ., Կասյան
Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Նազարով Ա. Գ., Սիմոնով Մ. Զ.,
Փինաճյան Վ. Վ. (պատ. խմբագիր տեղակալ)։

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Айюц Г. Т., Алексеевский В. В., Егизаров И. В., Касьян
М. В. (ответ. редактор), Назаров А. Г., Пинаджян В. В.
(зам. отв. редактора), Симонов М. З.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

М. А. КАРАПЕТЯН

ЗАРЯДКА ЧАСТИЦ ИОНАМИ ГАЗА ПРИ УЧЕТЕ ПЕРЕХОДНОГО
ХАРАКТЕРА УСТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электрическое поле в неоднородной среде устанавливается не мгновенно, а после переходного процесса, длительность которого определяется формой и концентрацией инородных включений, диэлектрическими проницаемостями и удельными электропроводностями шести компонентов [1-4]. Переходный характер установления электрического поля в системе воздух-частицы безусловно сказывается на величину зарядов последних, если длительность зарядки T частицы материала ионами газа ($T=0,01-1$ сек) соизмеримо с постоянной времени τ переходного процесса.

В известной теории зарядки частиц ионами воздуха, разработанной Потенье и Балабановым [5], переходный характер установления электрического поля в окрестностях заряжаемой частицы не учтен.

Кинетику зарядки сферических частиц (радиусом $a > 2 \cdot 10^{-6}$ м, когда диффузионной зарядкой можно пренебречь) ионами газа, при учете переходного характера установления электрического поля в системе воздух-частицы, можно рассчитать по уравнению

$$\frac{\partial q}{\partial s \partial t} = k(\rho_0 e - q)[E_{\text{н}}(t) - q/4\pi\epsilon_0 a^2], \quad (1)$$

где e — заряд иона; k — его подвижность; ρ_0 — начальная плотность ионов; ρ — плотность заряжаемых частиц; s — поверхность частицы; $q/4\pi\epsilon_0 a^2$ — напряженность собственного электрического поля частицы, обусловленного осажденным на ней, в данный момент, зарядом q ; $E_{\text{н}}$ — нормальная составляющая напряженности электрического поля в воздухе, на границе с частицей, обусловленного внешним полем (с напряженностью E_0) и полем поляризованных частиц.

Для лучшего понимания сущности (1) добавим, что $\rho_0 e$ — начальный заряд ионов в единице объема воздуха. Со временем этот заряд уменьшается, так как часть его — q осаждается на частицах. В квадратных скобках написана напряженность результирующего электрического поля в воздухе на границе с частицей, обуславливающего дрейф ионов к поверхности частицы.

Таким образом, правая часть (1) является потоком ионов ради-

ального направления, отнесенным к единице поверхности сферической частицы.

Согласно [2]

$$E_{2r}(t) = [1 + (2 + f)(m_1 - n_1)e^{-m_1} + n_1] |E_0 \cos \varphi = E_2(t) \cos \varphi, \quad (2)$$

где

$$m_1 = \frac{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)f}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)f}, \quad (3)$$

$$n_1 = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + 2\gamma_2 - (\gamma_1 - \gamma_2)f},$$

ε_1 , ε_2 и γ_1 , γ_2 — абсолютные диэлектрические проницаемости и удельные электропроводности материала частиц и воздуха соответственно; f — объемная концентрация частиц.

Во многих электротехнологических процессах объемная концентрация заряжаемых частиц f настолько мала ($f < 10^{-1}$), что взаимным влиянием полей поляризованных частиц можно пренебречь. В этих случаях в выражениях (2) и (3) следует подставлять $f = 0$.

Интегрирование (1) по параметру s можно осуществить методом Потенье, примененным также в [5].

Механизм зарядки сферических частиц ионами газа представляется следующим образом. Под действием положительного поля (положительным будем считать направление внешнего поля с напряженностью E_0) с напряженностью

$$E_p = E_0(t) \cos \varphi - \frac{q(t)}{4\pi\varepsilon_0 a^2} > 0 \quad (4)$$

ионы газа переносятся на поверхность частицы. Однако, с ростом заряда q область поверхности частицы, соответствующей телесному углу 2φ (рис. 1), где $E_p > 0$, уменьшается. Процесс зарядки частицы заканчивается, когда E_p становится равной нулю на всей поверхности частицы. При этом $\varphi = 0$, а заряд частицы, согласно (4),

$$q(T) = 4\pi\varepsilon_0 a^2 E_2(T). \quad (5)$$

Длительность зарядки частиц T может быть как больше, так и меньше τ_1 . Если

$$T \gg \tau_1, \quad (6)$$

то предельным для $q(t)$ является заряд

$$Q_m(\infty) = 4\pi\varepsilon_0 a^2 [1 + (2 + f)n_1] E_0. \quad (7)$$

В случае

$$T < 5\tau_1 \quad (8)$$

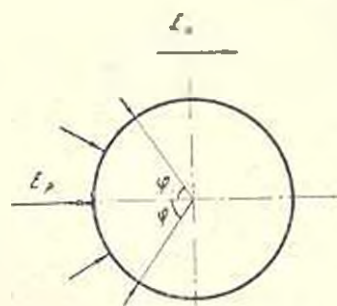


Рис. 1. К кинетике зарядки сферических частиц

предельным для $q(t)$ является заряд

$$Q_m(t) = 4\pi\epsilon_0 a^2 E_2(t), \quad (9)$$

где $t = T$. $Q_m(t)$ можно называть текущим значением предельного заряда частицы.

Условие (6) всегда, независимо от величины T , имеет место для проводящих частиц. Для одиночной ($f=0$) проводящей частицы ($\gamma_1 \gg \gamma_2$) из (7) получаем

$$Q_m(\infty) = 12\pi\epsilon_0 a^2 E_0, \quad (10)$$

что совпадает с соответствующей формулой Потенье.

Условие $T \ll \tau_1$ имеет место для частиц с удельной электропроводностью $\gamma_1 < 10^{-12}$ См/м. В этом случае из (9) получаем выражение

$$Q_m(T) \approx Q_m(0) = 4\pi\epsilon_0 a^2 [1 + (2+f)m_1] E_0 \quad (11)$$

которое при $f=0$ совпадает с формулой Потенье для предельного заряда диэлектрических частиц.

Таким образом, формулы Потенье для предельных зарядов проводящих и диэлектрических частиц могут быть получены из (9) при условиях $T \gg \tau_1$ и $T \ll \tau_1$, соответственно.

Пусть в некоторый момент времени $t < T$ граница заряжаемой поверхности на сферической частице определяется углом φ_0 . Косинус этого угла, определенный из (4) (при $E_p=0$), с учетом (9) равен

$$\cos \varphi_0 = \frac{q(t)}{Q_m(t)}. \quad (12)$$

Заменяя в (1) параметр x на φ , пользуясь выражением поверхности элементарного кольца на сфере

$$ds = 2\pi a^2 \sin \varphi d\varphi \quad (13)$$

и интегрируя (1) по φ в пределах от 0 до φ_0 , получим:

$$\frac{dq}{dt} = 2\pi a^2 k (n_0 e - \gamma q) \left[\frac{E_2(t)}{2} (1 - \cos^2 \varphi_0) - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a^2} (1 - \cos \varphi_0) \right]. \quad (14)$$

С учетом (9) и (12) уравнение (14) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} = & a^2 n_0 e k E_2(t) \cdot \left[\frac{n_0 e k}{2\epsilon_0} + \pi a^2 k \gamma E_2(t) \right] q + \\ & + \left[\frac{\gamma k}{2\epsilon_0} + \frac{n_0 e k}{16\pi\epsilon_0^2 a^2 E_2(t)} \right] q^2 - \frac{\gamma k}{16\pi\epsilon_0^2 a^2 E_2(t)} q^3. \end{aligned} \quad (15)$$

Уравнение (15) решено на ЭВМ для интервала времени $0 < t \leq 0,1$ с. Кривые зависимости $q(t)$ (рис. 2) получены для следующих числовых значений параметров: $n_0 = 10^{11}$ 1/м³; $f = 10^{-4}$; $k = 2 \cdot 10^{-1} \frac{\text{м/с}}{\text{В/м}}$; $a = 5 \cdot 10^{-4}$ м; $E_0 = 10^6$ В/м; $\epsilon_1 = 5\epsilon_0$; $\epsilon_2 = \epsilon_0$; $\gamma_2 = 10^{-14}$ См/м. Величина удельной электропроводности вещества заряжаемой частицы γ_1 варьировалась и

пределах от 0 до ∞ (по точкам: 0; 10^{-13} См/м; 10^{-11} См/м; 10^{-9} См/м; 10^{-7} См/м и ∞).

На рис. 3 приведены результаты расчета $q(t)$ для частного случая $\nu=0$ ($f=0$), при котором уравнение (15) значительно упрощается. Как и предполагалось, крайние кривые рис. 3 (при $\gamma_2=0$ и $\gamma_1=\infty$, т. е. при $T \ll \tau_1$ и $T \gg \tau_1$ соответственно) совпадают с зависимостями $q(t)$, полученными по кинетике Потенье для диэлектрических и проводящих частиц.

Рассмотрение кривых рис. 2 и 3 приводит к выводу, что кинетика зарядки частиц в поле с объемным зарядом, разработанная Потенье и Балабановым [5], верна при $\gamma_2 > 10^{-7}$ См/м и $\gamma_1 \leq 10^{-13}$ См/м.

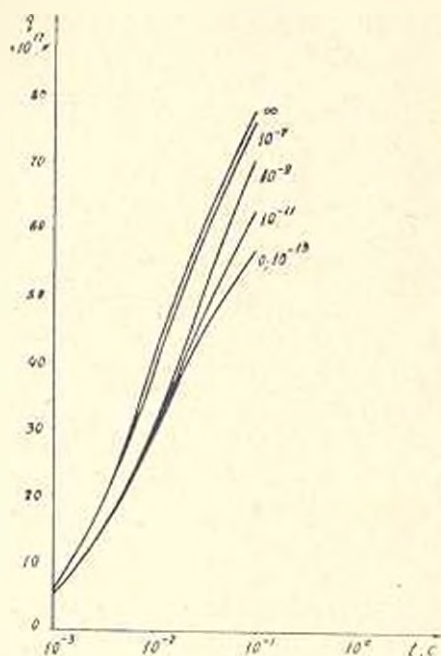


Рис. 2. Кинетика зарядки частиц в интервале времени $0 < t < 0,1$ с

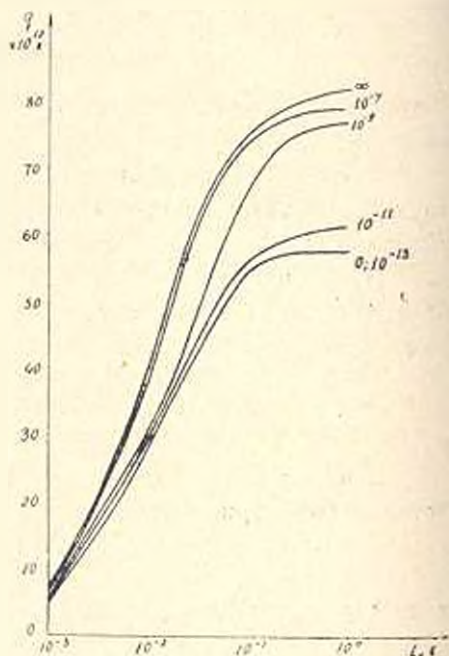


Рис. 3. Кинетика зарядки частиц в интервале времени $0 < t < 1$ с при $f=0$ ($\nu=0$)

В случаях 10^{-8} См/м $\gamma_2 > 10^{-12}$ См/м кинетика зарядки сферических частиц определяется уравнением (15) (или его частным случаем при $\nu=0$), которое учитывает переходный характер установления электрического поля. Погрешность расчета $q(t)$ частицы с удельной электропроводностью $\gamma_1=10^{-10}$ См/м по одной из формул Потенье может достигать $\pm 50\%$.

Для учета влияния поверхностной проводимости частицы на кинетику ее зарядки необходимо в (15) в качестве переходной функции напряженности электрического поля в воздухе E полюса сферы $E_2(t)$ подставить выражение [6]

$$E_2(t) = |1 + (2 + f)(m_2 - n_2)e^{-t/\tau_2} + n_2| |E_0|, \quad (16)$$

где

$$\gamma_2 = \frac{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)f}{\gamma_1 + 2\gamma_2 - (\gamma_1 - \gamma_2) + 2\gamma_1(1-f)}; \quad (17)$$

$$n_1 = \frac{\gamma_1 - \gamma_2 + 2\gamma_1}{\gamma_1 + 2\gamma_2 - (\gamma_1 - \gamma_2) + 2\gamma_1(1-f)}; \quad \gamma = \frac{\gamma_s}{a} = \frac{\lambda\gamma_1}{a};$$

$\gamma_s = \lambda\gamma_1$ — удельная поверхностная проводимость вещества частицы;
 λ — коэффициент с размерностью M .

Поскольку $a \ll 1$, то при $\lambda > 0,1$ и $\lambda\gamma_1/a \gg \gamma_1 > \gamma_2$. Следовательно, при $f=0$

$$\gamma_2 = \frac{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2}{2 \frac{\lambda\gamma_1}{a}}, \quad n_1 \approx 1. \quad (18)$$

Учет поверхностной проводимости заряжаемой частицы равносильно повышению удельной объемной проводимости частицы от величины γ_1 до $2 \frac{\lambda}{a} \gamma_1$ (при условии $\gamma_s = 0$). Отсюда следует, что частица с удельной объемной электропроводностью $\gamma_1 = 10^{-13}$ См/м и удельной поверхностной проводимостью $\gamma_s = \lambda\gamma_1 = 1 \cdot 10^{-13}$ См при $a = 10^{-4}$ м будет заряжаться в электрическом поле с объемным зарядом точно так, как заряжается частица тех же размеров при $\gamma_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ См/м и $\gamma_s = 0$.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что влияние поверхностной проводимости частицы на кинетику зарядки зависит от ее размеров.

Учет переходного характера установления электрического поля в системе воздух-частица равносильно учету влияния проводимостей веществ (диэлектрических, полупроводящих) на кинетику зарядки этих частиц. При поляризации частицы с проводимостью отличной от нуля на ее поверхности накапливаются не только связанные, но и свободные заряды. Представляет значительный интерес определить связь между величинами поляризованного свободного заряда $q_{\text{св}}|_{t \rightarrow \infty}$ на сферической поверхности частицы в однородном электрическом поле напряженности E_0 и предельного заряда частицы Q_m в поле той же напряженности при наличии объемных зарядов.

Свободный поляризованный заряд на полусферической поверхности частицы в установившемся режиме будет:

$$q_{\text{св}}(\infty) = \pi a^2 \varepsilon_0(\infty), \quad (19)$$

где $\varepsilon_0(\infty)$ — максимальная плотность этих зарядов на полюсе частицы,

$$\varepsilon_0(\infty) = \varepsilon_2 E_2(\infty) - \varepsilon_1 E_1(\infty). \quad (20)$$

Пользуясь выражениями $E_1(t)$, $E_2(t)$ из [2] и формулами (19) и (20), в частном случае одиночной частицы ($f=0$), для свободного поляризованного заряда получим:

$$q_{\text{св}}(\infty) = 3\pi\epsilon_0 a^2 \frac{K - \gamma_1}{K + 2} E_0 \quad (22)$$

где $K = \gamma_{11}/\gamma_1$; γ_1 — относительная диэлектрическая проницаемость вещества частицы.

Отношение предельного заряда Q_m по формуле (7) (при $f=0$) к $q_{\text{св}}(\infty)$ будет:

$$\eta = 4K/(K - \gamma_1). \quad (22)$$

При $K \gg \gamma_1$, что почти всегда имеет место, $\eta = 4$ и

$$Q_m \approx 4q_{\text{св}}(\infty) = 4\pi a^2 \epsilon_0(\infty). \quad (23)$$

Из (23) можно сделать вывод, что равномерная плотность зарядов на сферической поверхности частицы при ее зарядке в поле коронного разряда равняется (при условии $K \gg \gamma_1$) максимальной плотности свободного поляризованного заряда частицы, расположенной в электрическом поле той же напряженности, но без объемных зарядов.

Поскольку удельная электропроводность воздуха $\gamma_2 = 10^{-14} - 10^{-15}$ С.м/м, то для всех частиц с удельной электропроводностью $\gamma_1 > 10^{-12} - 10^{-13}$ С.м/м условие (23) соблюдается с высокой точностью.

Рассмотрение работы [7] приводит к выводу, что соотношение (23) верно и для эллипсоидальных частиц, если одна из осей (например, $2a$) трехосного эллипсоида направлена по внешнему полю. Здесь $q_0(\infty)$ является плотностью свободных зарядов на вершине эллипсоида по оси $2a$.

Пользуясь выражениями $E_1(t)$, $E_2(t)$ работы [3] и формулами (20) и (23), находим, что предельный заряд ориентированной эллипсоидальной частицы

$$Q_m = 4\pi bc[\epsilon_2 - \epsilon_1 + (\gamma_{11} - \gamma_2)\epsilon_1] E_0, \quad (24)$$

где

$$\epsilon = \frac{\epsilon_2 + (\epsilon_1 - \epsilon_2)(1-f)N_a}{\gamma_2 + (\gamma_{11} - \gamma_2)(1-f)N_a}, \quad (25)$$

N_a — коэффициент деполаризации эллипсоида (с полюсами a , b , c) вдоль оси $2a$; $\epsilon_2 = \epsilon_0$.

В случае одиночной проводящей ($\gamma_{11} = \infty$) частицы

$$Q_m = 4\pi\epsilon_0 bc \frac{E_0}{N_a}, \quad (26)$$

что совпадает с Q_{ma} работы [7].

После несложного преобразования, выражение (24) запишется в виде:

$$Q_m = 4\pi\epsilon_0 bc \frac{K - \gamma_1}{1 + (K - 1)(1-f)N_a} E_0. \quad (27)$$

При $K \gg \chi_1$ и $f=0$

$$Q_m \approx 4\pi\epsilon_0 bc \frac{K}{1+KN_a} E_0. \quad (28)$$

Для сильно вытянутых диэлектрических частиц (текстильные волокна в сухом воздухе) $KN_a \ll 1$. Тогда

$$Q_m = 4\pi\epsilon_0 bc K E_0. \quad (29)$$

В случае сплюснутой эллипсоидальной частицы с заметной проводимостью ($KN_a \gg 1$)

$$Q_m = 4\pi\epsilon_0 bc \frac{E_0}{N_a}. \quad (30)$$

Сравнивая (26), (29) и (30), можно сделать вывод, что частицы в форме сплюснутого эллипсоида с проводимостью, превышающей проводимость воздуха на 3–4 порядка ($K=10^3-10^4$), в электрическом поле с объемным зарядом заряжаются как проводники. Для сохранения этой же закономерности в случае вытянутых эллипсоидов величина K должна сильно расти.

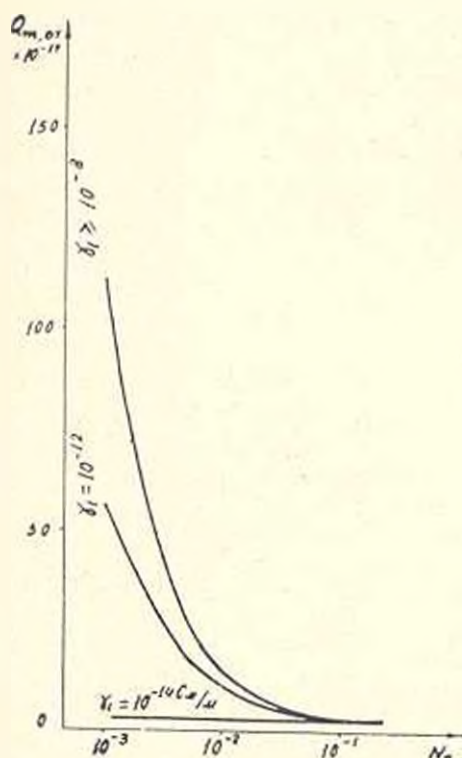


Рис. 4. Зависимость предельного (относительного) заряда эллипсоидальной частицы от удельной электропроводности γ и коэффициента деполаризации вдоль полуоси $a-N_a$

На рис. 4 приводятся результаты расчета величины предельного относительного заряда эллипсоидальной частицы $Q_{m,от} = Q_m/E_0$ в зависимости от N_a и γ_1 . Расчет произведен по формуле (24) при $\epsilon_1 = 5 \times 10^{-15}$ С.м./м., $\gamma_2 = 10^{-15}$ С.м./м., $b = c = 10^{-4}$ м. Поскольку длины двух полуосей b и c эллипсоида рассматриваются здесь постоянными, то зависимость $Q_{m,от}$ от N_a фактически является зависимостью предельного заряда (относительного) от длины вытянутого эллипсоида вращения.

Если при $\gamma_1 = 10^{-14}$ С.м./м. заряд эллипсоида слабо зависит от N_a , то при $\gamma_1 \geq 10^{-12}$ С.м./м. эта зависимость очень сильная.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 7.XII.1973.

Մ. Ա. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԼԻՑԲԱՎՈՐՈՒՄԸ ԳԱՋԻ ԻՈՆՆԵՐՈՎ, ԵՐԲ ՀԱՇՎԻ Է ԱՌԵՎՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ՀԱՍՏԱՏՄԱՆ ԱՆՅՈՂԻ ԲՆՈՒՅԹԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Էլեկտրական դաշտը պազ-լիցքավորվող մասնիկներ սխտեմում հաստատվում է անցողիկ պրոցեսից հետո: Երբ մասնիկի լիցքավորման ժամանակը և հաստատվող էլեկտրական դաշտի ժամանակային հաստատունը համեմատելի մեծություններ են, ապա մասնիկի լիցքի մեծությունն անփոփոխ կախված է դաշտի անցողիկ պրոցեսից:

Հոդվածում ուսումնասիրվում է սֆերիկ մասնիկի լիցքավորման էինետիկան, առաջարկվում են բանաձևեր սֆերիկ և էլիպսոիդաձև մասնիկների սահմանային լիցքի հաշվարկի համար, հաշվի առնելով դաշտի հաստատուն անցողիկ պրոցեսը (կամ այլ կերպ՝ մասնիկի նյութի էլեկտրական հաղորդականությունը):

ЛИТЕРАТУРА

1. Джугарис Ч. М., Вейсхайзер Г. В., Штейнрайбер В. Я. Трехосный диэлектрический эллипсоид в электрическом поле при учете проводимости. «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», № 1, 1969.
2. Карапетян М. А., Арамян М. А. Электрическое поле в дисперсной системе со сферическими включениями. «Известия АН Арм. ССР. Физика», № 6, 1971.
3. Карапетян М. А. Перераспределение постоянного поля в дисперсной системе с эллипсоидальными включениями. «Электричество», № 10, 1971.
4. Карапетян М. А. Исследование электрического поля в дисперсной системе с включениями двух типов. «Электричество», № 11, 1972.
5. Балябанов Е. М. Зарядка частиц в электрическом поле коронного разряда при большой запыленности газа. «Электричество», № 2, 1965.
6. Карапетян М. А. Электрическое поле в дисперсной системе при учете поверхностной проводимости включений. «Электронная обработка материалов», № 4, 1973.
7. Пашин М. М. Заряд проводящего эллипсоида, находящегося в электрическом поле с объемным зарядом. Труды Московского энергетического института, вып. 64, 1965.

ЭНЕРГЕТИКА

С. Г. МУРАДЯН, В. Ш. МАРТИРОСЯН

АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА АМЭС-2М,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ
УРАВНЕНИЙ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ В РАСЧЕТАХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

При расчетах и исследованиях электромеханических переходных процессов сложных энергосистем на автоматизированной модели АМЭС-2 [1] уравнения эквивалентных генераторов и нагрузочных узлов решаются методом последовательных интервалов. Применение устройств решения уравнений генераторных узлов по [2] в АМЭС-2 не представляется целесообразным ввиду ожидаемых больших погрешностей в решении, присущих методу «шаг за шагом», который по своей точности значительно уступает методу Эйлера-Коши. Из-за ожидаемых больших погрешностей в решении нецелесообразно также применение на АМЭС-2 устройства решения уравнений нагрузочных узлов [3], в котором реализован метод Эйлера.

Устройства решения дифференциальных уравнений генераторных и нагрузочных узлов, введенные на АМЭС-2, а также и на модернизированной АМЭС-2М, построены на основе [4], в них реализован алгоритм, обеспечивающий высокую точность решения [5].

Исходные уравнения. Так как устройства решения уравнений генераторных и нагрузочных узлов на АМЭС-2М по своему принципу действия идентичны, то в настоящей статье приводятся только результаты разработок схем устройства решения уравнений генераторных узлов. В качестве уравнений генераторных узлов на АМЭС-2М (также, как и на АМЭС-2) приняты:

$$E' = \text{const};$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{360f}{M} (P_T - P_r - P_v);$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{17}}{T_s} + \frac{1}{360f} \cdot \frac{d\delta}{dt} - \frac{\beta}{T_s} P_v. \quad (1)$$

В уравнениях (1) обозначения общепринятые.

Алгоритм расчета. Сущность алгоритма, изложенного в [5], применительно к приведенным выше уравнениям заключается в следующем. Предположим, что в k -ом интервале времени решение уравнений (1) закончилось и производится решение для $(k+1)$ -го интервала. Для всех генераторных узлов известны значения переменных конца k -го интервала, которые являются начальными условиями для $(k+1)$ -го интервала и записаны в соответствующих элементах запоминающих устройств. Результатами решения уравнений (1), которые вводятся в модель электрической сети через генераторные узлы, являются E' и δ , причем, генераторные элементы АМЭС-2М обеспечивают постоянство E' . Независимые переменные P_i получаются от модели сети в каждом интервале расчета и запоминаются. Решение уравнений (1) в каждом интервале времени осуществляется в два этапа. На первом — „грубом“ — этапе расчета для всех генераторных узлов методом прямого моделирования поочередно решаются уравнения (1) с постоянными значениями P_{Gi}^k за интервал времени $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

В результате интегрирования получаются „грубые“ значения $\tilde{\delta}_i^{k+1}$, которые устанавливаются на генераторных элементах АМЭС-2М и запоминаются. В модели сети решаются уравнения электрической сети также методом прямого моделирования, в результате чего определяются „грубые“ значения $\tilde{P}_{Gi}^{k+1}$, соответствующие концу $(k+1)$ -го интервала.

На втором этапе расчета производится уточнение результатов „грубого“ решения. Оно осуществляется путем повторного решения уравнений (1) с более точным учетом закона изменения независимых переменных P_{Gi} , изменяя их по линейному закону между значениями концов k -го и $(k+1)$ -го интервалов:

$$P_{Gi} = P_{Gi}^k + \frac{\tilde{P}_{Gi}^{k+1} - P_{Gi}^k}{\Delta t} t. \quad (2)$$

Такое уточнение позволяет кривые изменения независимых переменных с высокой точностью аппроксимировать ломаной линией. На основании полученных уточненных значений $\tilde{\delta}_i^{k+1}$ производится повторное решение уравнений электрической сети. Результаты P_i^{k+1} , совместно с $\left(\frac{d\delta_i}{dt}\right)^{k+1}$, $\left(\frac{dP_{Gi}}{dt}\right)^{k+1}$ и $\tilde{\delta}_i^{k+1}$, используются при решении уравнений (1) и (2) в $(k+2)$ -ом интервале времени по изложенному алгоритму. Аналогично производится решение и для последующих интервалов.

Схема устройства для решения уравнений генераторного узла. На рис. 1 приведена схема устройства для решения уравнений (1) и (2) по вышеизложенному алгоритму.

Начальные значения переменных — P_i^k , хранятся в блоке запоми-

нающих конденсаторов ЗК1 и в запоминающем устройстве интегратора ЗУИ-1, выполненных на операционных усилителях с конденсаторами в цепях обратных связей. Этап „грубого“ решения производится схемой моделирования уравнений (1), включающей ЗУИ2, ЗУИ3 и ЗУИ4, которая получается после отключения нормально замкнутых (н. з.) коммутирующих элементов 1 и включения нормально разомкнутых (н. р.) коммутирующих элементов 2. Значения P_k снимаются

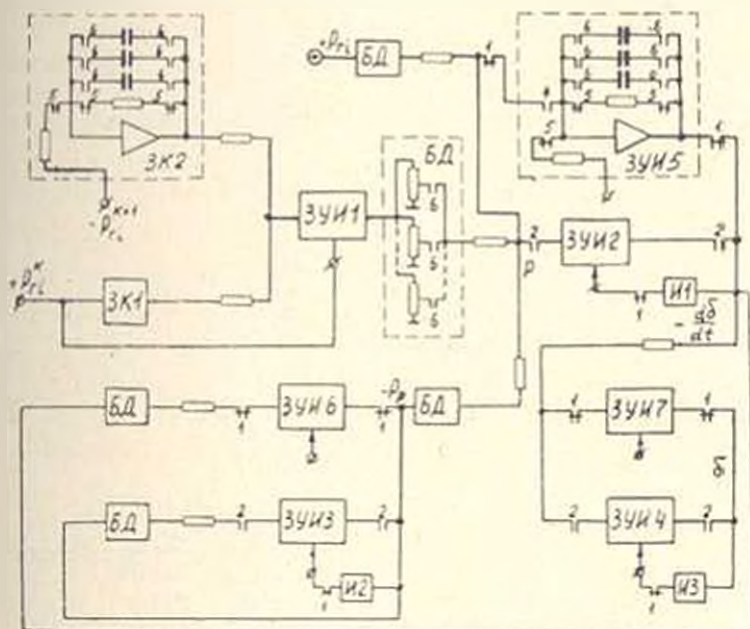


Рис. 1

с выхода ЗУИ1 и в течение каждого интервала расчета остаются неизменными. Поочередным переключением конденсаторов в обратных связях операционных усилителей в ЗУИ1-ЗУИ4 и в делителях напряжения в блоках БД, воспроизводящих коэффициенты уравнений отдельных генераторных узлов, производится набор схемы решения уравнений каждого генераторного узла. Интегрирование осуществляется устройствами ЗУИ2, ЗУИ4, когда замыкаются н. р. коммутирующие элементы 4, так как в этом режиме н. з. коммутирующие элементы 5 разомкнуты и поочередно замыкаются элементы 6, тем самым образуя схемы интеграторов на операционных усилителях.

Результаты „грубого“ решения $\bar{z}^{k+1}$ с выхода ЗУИ4 через прямые преобразователи и генераторные элементы АМЭС-2М [1] вносятся в модель электрической сети. Когда на всех генераторных элементах устанавливаются полученные „грубые“ значения $\bar{z}^{k+1}$, на модели сети воспроизводится $(k+1)$ -ый „грубый“ режим, откуда путем измерения определяются P_{ii}^{k+1} и запоминаются на конденсаторах ЗК2.

В режиме уточнения переменные $-P_{Ti}$ получаются также с выхода ЗУИ1, причем, при помощи ЗК1, ЗК2 и ЗУИ1 осуществляется моделирование уравнения (2), так как на выходах ЗК1 и ЗК2 получаются $-P_{Ti}^k$ и P_{Ti}^{k-1} , а ЗУИ1 осуществляет операцию интегрирования, в результате чего воспроизводится линейный закон изменения P_{Ti} от значений P_{Ti}^k до P_{Ti}^{k-1} .

Интегрирование уравнений (1) производится при помощи ЗУИ5, ЗУИ6 и ЗУИ7, так как и, а. коммутирующие элементы 1 в этом режиме замкнуты, а и. р. коммутирующие элементы 2 разомкнуты. На выходах ЗУИ5÷ЗУИ7 получаются уточненные значения $\left(\frac{d\delta_i}{dt}\right)^{k-1}$,

$\left(\frac{dP_{Ti}}{dt}\right)^{k-1}$ и δ_i^{k-1} , которые запоминаются на соответствующих конденсаторах этих ЗУИ и через инверторы И1÷И3 вводятся в ЗУИ2÷ЗУИ4, где они также запоминаются. Эти значения переменных будут являться начальными условиями в $(k+2)$ -ом интервале расчета.

Программное управление решением. Изложенный алгоритм позволяет одновременно решать уравнения i -го генераторного и k -го нагрузочного узлов, благодаря разделению этих узлов от общей системы и приближенному воспроизведению закона изменения перемен-

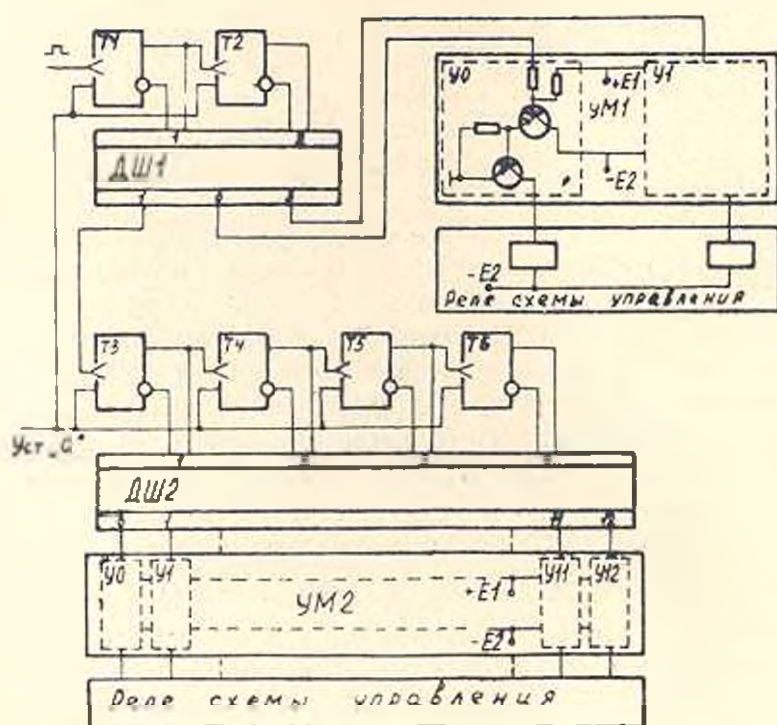


Рис. 2

ных $P_{гi}$ и $U_{гi}$, где $U_{гi}$ напряжение в узле нагрузки. Причем, в каждом интервале расчета для каждого узла требуется выполнять следующие операции: набор схемы моделирования уравнений генераторного (нагрузочного) узла; интегрирование этих уравнений в течение одного интервала; останов интегрирования с целью установки полученных результатов на соответствующем генераторном (нагрузочном) элементе; переход к схеме моделирования уравнений последующего генераторного (нагрузочного) узла.

Алгоритм решения уравнений и поочередность обхода генераторных и нагрузочных узлов с выполнением перечисленных выше операций в виде жестких программ заложены в блоке программного управления (БПУ) модели. В БПУ АМЭС-2 указанные жесткие программы были реализованы с помощью электромеханических шаговых искателей и реле (в качестве исполнительных органов). Опыт эксплуатации моделей АМЭС-2 показал, что такие БПУ не обладают гибкостью управления и имеют ограниченное (до 0,1 с) быстродействие.

В БПУ АМЭС-2М, с целью повышения быстродействия и гибкости управления, программы расчета электромеханических переходных процессов реализованы с помощью электронных распределителей и реле в качестве исполнительных органов. Исследования показали, что для выполнения поставленной задачи наиболее экономичными и надежными являются многокоординатные распределители, которые, в частном случае, имеют схему, приведенную на рис. 2. Управляющий распределитель (Т1, Т2, ДШ1 и УМ1) вырабатывает команды для подключения цепей интегрирования ЗУИ в процессе решения и их отключения для отработки получаемых результатов. Основной распределитель (Т3—Т6, ДШ2, УМ2) управляется от выхода 1 ДШ1, вырабатывает команды для переключения коммутирующих элементов ЗУИ и БД. Умощнители УМ1 и УМ2 обеспечивают ток нагрузки до 2 а. С помощью схемы рис. 2 можно производить управление генераторными и нагрузочными узлами числом до 14.

Вывод. Благодаря реализации на АМЭС-2М более точного алгоритма решения уравнений и замене шаговых искателей БПУ электронными распределителями, возможно исследовать более длительные переходные процессы.

АрмНИИЭ

Поступило 2.X.1972.

Ս. Գ. ՄԱՐԿԻՅԱՆ, Վ. Շ. ՄԱՐԿԻՐՈՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԴԵՆԱՆԻԿԱԿԱՆ ԱՆՑՈՂՅԻ ՆՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐԱԼՆԵՐԴԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՐԱԿԱՐԳԻ ՀԱՆԴՈՒՅՑՆԵՐԻ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԸ ԼՈՒՇՈՂ ԱՐԷՍ — 2Մ ԱՆԱԼՈՂԱՅԻՆ ՈԱՐՔԵՐ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում դիտվում են էներգահամակարգերի գեներատորային ու բեռնվածային հանգույցների դիֆերենցիալ հավասարումների լուծման ալգորիթը

և ալգորիթմն իրացնող սարքերի սխեմաները, որոնք ներդրված են ԱՄԷՍ—2 և ԱՄԷՍ—2Մ ավտոմատացված մոդելների վրա: Իրացված ալգորիթմը տպահովում է դիֆերենցիալ հավասարումների լուծման ավելի մեծ ճշտությունը և ննարավորություն է տալիս ԱՄԷՍ—2Մ-ի վրա հետադուրի երկարատև էլեկտրամեխանիկական անցողիկ երևույթները, խոծման բնթացքը զեկավարող սարքերը, որոնք կառուցված են բազմակոորդինատային էլեկտրոնային բաշխիչների վրա, հնարավորություն են տալիս ավելի՝ քան 2 անգամ բարձրացնել ԱՄԷՍ—2Մ-ի արագագործությունը ԱՄԷՍ—2-ի համեմատությամբ:

ЛИТЕРАТУРА

1. Адомян Г. Т., Гамбузян К. А., Мурадян С. Г. Автоматизированная модель энергосистем «Электрические станции», № 4, 1970.
2. Акапян С. Г., Матевосян П. А., Мурадян С. Г. Решение уравнений синхронного генератора на аналоговой машине по методу последовательных интервалов. «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», № 5, 1966.
3. Гамбузян К. А. Моделирование нагрузок МСНТ с помощью аналоговой машины. «Известия АН Арм. ССР (серия технических наук)», № 1, 1961.
4. Мурадян С. Г. Аналоговое вычислительное устройство последовательного действия. Авторское свидетельство № 315184, приоритет от 21 июня 1969. «Изобретение, промышленные образцы, товарные знаки», № 28, 1971.
5. Мурадян С. Г. Решение дифференциальных уравнений на автоматизированной модели «Электрические системы». «Электричество», № 5, 1971.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Ю. М. ХОДЖАЯНЦ, А. С. ШАХКАМЯН

РАСЧЕТ МОСТОВОЙ СХЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ НЕРАБОЧЕГО ДИАПАЗОНА Т.Э.Д.С. С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ Т.Э.Д.С. СВОБОДНЫХ КОНЦОВ ТЕРМОПАРЫ

Одним из путей повышения точности измерения температуры термопарой (T_n) является применение дифференциального метода измерения (подавление т.э.д.с. нерабочего диапазона). В большинстве случаев необходимо вводить устройства автоматической компенсации т.э.д.с. свободных концов T_n , поэтому схему подавителя целесообразно выбрать такой, чтобы одновременно осуществлялась также автокомпенсация. Для решения этой задачи применяются неравновесные мостовые схемы, однако отсутствие инженерного метода расчета ограничивает область их применения.

Ниже рассмотрен метод расчета мостовой схемы подавителя, обеспечивающей автокомпенсацию т.э.д.с. свободных концов T_n . Схема подавителя приведена на рис. 1.

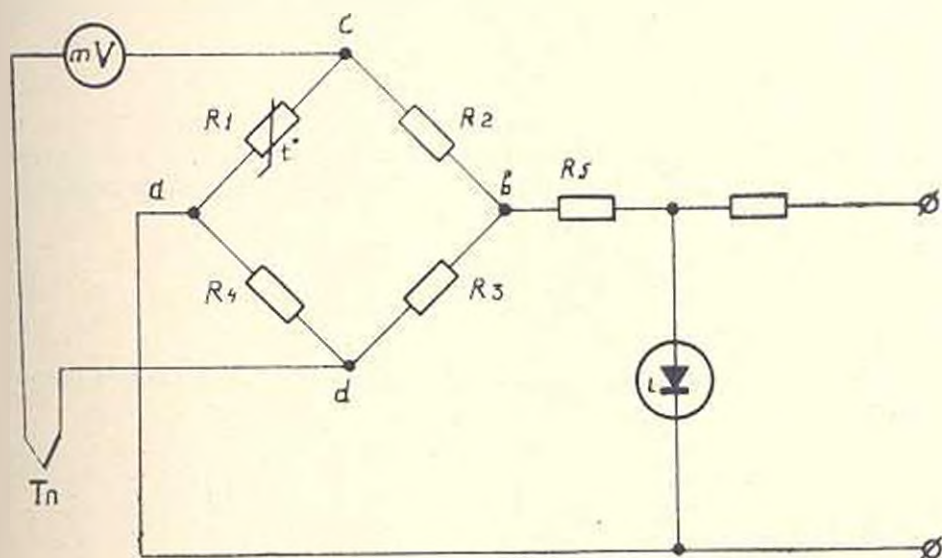
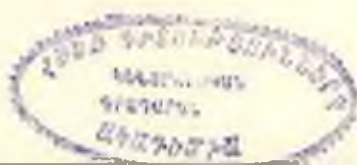


Рис. 1

Автокомпенсация т.э.д.с. свободных концов осуществляется благодаря применению в плече ac медного резистора с сопротивлением

$$R_1 = R(1 + \alpha t), \quad (1)$$



где $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ — температурный коэффициент сопротивления медного резистора;

R — сопротивление резистора при $t = 0^\circ\text{C}$;

t — температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$.

Подавление т.э.д.с. нерабочего диапазона целесообразно производить выбором соответствующего значения сопротивления четвертого плеча, при одинаковых сопротивлениях второго и третьего плеч. Для упрощения расчетов принимаем:

$$R_2 = R_3 = R; \quad R_4 = aR; \quad R_5 = \varphi R, \quad (2)$$

где a, φ — расчетные коэффициенты.

Для обеспечения высокой точности подавитель питается от однокаскадного параметрического стабилизатора напряжения

$$U_{ct} = U_0(1 + \alpha_{ct}t), \quad (3)$$

где U_0 — напряжение стабилизации при $t = 0^\circ\text{C}$; α_{ct} — т. к. п. стабилитрона. Если мостовая схема и свободные концы Тп находятся в одинаковых условиях, то при точной работе схемы выходная э.д.с. моста должна изменяться по закону

$$e_{\text{вых}} = e_{cd} - e_{cdo} - e_{\text{тп}}, \quad (4)$$

где $e_{\text{тп}} = K_{\text{тп}}t$ — т. э. д. с. свободных концов Тп; $K_{\text{тп}}$ — коэффициент линейаризации т. э. д. с. в диапазоне температур свободных концов. При температуре окружающей среды 0°C выходная э.д.с. моста, следовательно, подавляемая т.э.д.с. будет:

$$e_{cdo} = e_s = U_{abo} \frac{a-1}{2(a+1)}, \quad (5)$$

где U_{abo} — напряжение питания моста при 0°C .

Из (5) следует, что требуемое значение подавляемой т. э. д. с. можно получить соответствующим выбором коэффициента a или напряжения питания моста U_{abo} , которое, для принятых выше обозначений, будет:

$$U_{abo} = \frac{U_0}{1 + \varphi \frac{3+a}{2(1+a)}}. \quad (6)$$

Напряжение питания моста, в общем случае, описывается выражением:

$$U_{ab} = U_{abo} \frac{(2 + \alpha t)(1 + \alpha_{ct}t)}{2 \left[1 + \frac{\alpha}{2}t \left[\frac{2}{3+a} + \frac{1+a}{3+a} \cdot \frac{U_{abo}}{U_0} \right] \right]}, \quad (7)$$

где R_{ab} — сопротивление моста по диагонали ab .

С достаточной для практики точностью можно принять:

$$\frac{1 + \alpha_{ct}t}{1 + \frac{\alpha}{2}t \left[\frac{2}{3+a} + \frac{1+a}{3+a} \cdot \frac{U_{abo}}{U_0} \right]} = 1 - 3t,$$

где β — расчетный коэффициент, зависимость которого от коэффициента a (при $\alpha_{ст} = 0,0006$, $\frac{U_{abo}}{U_0} < 0,01$) приведена на рис. 2.

Тогда напряжение питания моста опишется простым выражением

$$U_{ab} = U_{abo} \left(1 + \frac{\beta}{2} t \right) (1 - \beta t) \quad (8)$$

и для данного источника питания может быть легко определено при любой температуре окружающей среды.

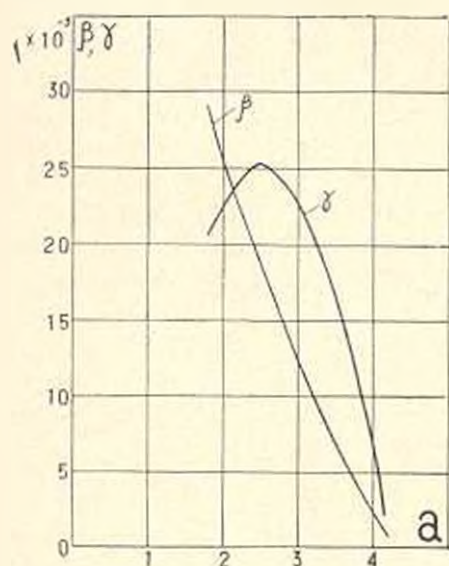


Рис. 2

Выходная э.д.с. моста, в общем случае, будет:

$$e_{ed} = U_{ab} \frac{a - 1 - \alpha t}{(a + 1)(2 + \alpha t)} = e_0 \left(1 - \frac{\alpha_1}{a - 1} t \right), \quad (9)$$

где

$$\alpha_1 = \alpha + \gamma; \quad \gamma = \beta(a - 1 - \alpha t).$$

Зависимость $\gamma = f(a)$ при $\alpha_{ст} = 0,0006$ и $\frac{U_{abo}}{U_0} < 0,01$ приведена на рис. 2.

Из выражений (5), (8) и (9) для составляющей э.д.с. моста, зависящей от температуры, получим следующее выражение:

$$e_0 - e_{ed} = \frac{U_{abo}}{2(1+a)} \alpha_1 t. \quad (10)$$

Тогда, для точной автокомпенсации т.э.с. свободных концов Тп. нужно обеспечить условие

$$K_{\text{тн}} = \frac{a_1 U_{ab0}}{2(1+a)} \quad (11)$$

Из выражений (5) и (11) для точной работы схемы получим:

$$U_{ab0} = 4 \frac{K_{\text{тн}}}{a_1} + 2e_0 = 2e_0 \frac{a+1}{a-1}; \quad (12)$$

$$a = \frac{U_{ab0} + 2e_0}{U_{ab0} - 2e_0} = 1 + \frac{2e_0}{K_{\text{тн}}} + \frac{\gamma e_0}{K_{\text{тн}}} \quad (13)$$

По кривым рис. 2, путем последовательных приближений, определяется значение коэффициента a , удовлетворяющее выражению (13) для требуемого значения e_0 . Значение напряжения питания U_{ab0} вычисляется по формуле (12), а по формуле (8) и значению β из рис. 2 вычисляются значения U_{ab} при разных температурах окружающей среды.

Значения коэффициента a и напряжения U_{ab} (при применении стабилитрона Д814А), для различных значений подавляемой т. э. д. с. градуировок ХА, ХК, ПП-1, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Градуировка термопары	Диапазон измерения		a	$U_{ab}, \text{ мВ}$
	начало, °С	конец, °С		
ХА	200	T	1,890	$52,7(1+1,33 \cdot 10^{-3} t)$
	300		2,348	$60,7(1+1,10 \cdot 10^{-3} t)$
	400		2,810	$69,0(1+1,00 \cdot 10^{-3} t)$
	500		3,260	$77,9(1+0,95 \cdot 10^{-3} t)$
	600		3,678	$87,0(1+0,88 \cdot 10^{-3} t)$
	700		4,076	$96,2(1+0,85 \cdot 10^{-3} t)$
ХК	200	T	1,985	$88,8(1+1,22 \cdot 10^{-3} t)$
	300		2,550	$104,9(1+1,06 \cdot 10^{-3} t)$
ПП-1	500	T	4,085	$13,9(1+0,70 \cdot 10^{-3} t)$

Значение R выбираем, исходя из требуемого значения выходного сопротивления моста, которое при $t=0^\circ\text{C}$ будет

$$R_{\text{вых}} = \frac{2(1+a)}{3-a} R. \quad (14)$$

Определим погрешность выходного сигнала моста в зависимости от погрешностей наладки параметров схемы. С достаточной для практики точностью связь между погрешностями можно определить дифференцированием соответствующих выражений.

Погрешность выходного сигнала из (9) будет:

$$\gamma_{\text{вых}} \approx \frac{1}{1-t/T_0} \gamma_{e_0} - \frac{1}{T_0/t-1} \gamma_{a_1} - \frac{1}{T_0/t-1} \gamma_t, \quad (15)$$

где T_1 — нижний предел измерения (подавляемый сигнал);

$$\gamma_a \approx \gamma_0 + \frac{2}{a^2 - 1} \gamma_1 - \text{погрешность подавляемого сигнала;}$$

γ_a — погрешность коэффициента a ($\gamma_a < 0,2\%$);

γ_t — погрешности измерения температуры окружающей среды;

γ_1 — погрешности коэффициента z_1 ($\gamma_1 < 0,2\%$);

γ_0 — погрешность установки напряжения питания моста при $t = 0^\circ\text{C}$.

Погрешность γ_0 из (8) будет:

$$\gamma_0 \approx \gamma_{U_{ab}} + \frac{\beta t_1}{1 - \beta t_1} \gamma_3 - \frac{\alpha t_1}{2 + \alpha t_1} \gamma_4, \quad (16)$$

где $\gamma_{U_{ab}}$ — погрешность установки напряжения питания моста при температуре t_1 ;

γ_3 — погрешность измерения температуры t_1 ;

γ_4 — погрешность расчета коэффициента β ($\gamma_4 < 5\%$).

Принимая все составляющие погрешности случайными и независимыми, нормированными удвоенным значением среднесquareтической погрешности ($\gamma = 2\sigma$), при $\gamma_4 = 5\%$ и $\gamma_{U_{ab}} = 0,2\%$ получим $\gamma_0 < 0,35\%$ и $\gamma_a < 0,4\%$.

Погрешность выходного сигнала в основном зависит от погрешностей γ_a и γ_0 .

Для уменьшения γ_a резисторы плеч моста нужно изготовить с высокой точностью. Тогда наладка подавителя сводится к установлению требуемого значения напряжения питания моста U_{ab} с необходимой точностью.

Поступило 6.IX.1973.

АНН. И. БИДЖАНОВ, А. И. БАДЖАНОВ

ՋԵՐԵԱԶՈՒՅԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ԴԱՊԱՋՈՆԻ ԶԵՐՄԱ—Է. Շ. ՈՒ-Ի ՄԱՐԴԱՆ
ԵՎ ԱԶԱՏ ՄԱՅՐԻՐԻ ԶԵՐՄԱ—Է. Շ. ՈՒ-Ի ԱՎՏՈՄԱՏ ԿՈՄՊԵՆՍԱՑՄԱՆ
ԿԱՐԵԶԱԿՈՅԻ ՈՒՆԵՐԱՅԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ջերմագույզով ջերմաստիճանի չափման հշտության բարձրացման համար նպատակահարմար է օգտագործել չափման դիֆերենցիալ մեթոդը և կոմպենսցնել ադատ ծայրերի ջերմա— է. շ. ու.— ն: Նշված պահանջների իրականացման համար օգտագործվում է չափաստարակչոված կամբյակային սխեմա (նկ. 1), որի հաշվարկի մեթոդը բերված է հոդվածում: Բերված են պարամետրների հաշվարկային բանաձևերը և տարբեր գործոններից առաջացող սխալների հաշվման բանաձևերը, ինչպես նաև սխեմայի կարգավորման մեթոդը:

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Б. М. МАМИКОНЯН

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОДНОГО КЛАССА

Трансформаторные преобразователи перемещений нашли широкое распространение в информационно-измерительной технике благодаря своей простоте, большой выходной мощности и отсутствию подвижного электрического контакта. Они применяются, в основном, в качестве:

- 1) датчиков различных механических величин;
- 2) компенсирующих преобразователей в электромеханических приборах автоматического уравнивания.

Основным требованием, предъявляемым к трансформаторным преобразователям (ТП) первой группы, является высокая чувствительность при малых габаритах. Это обусловлено тем, что преобразователь часто работает непосредственно на малочувствительный указатель или исполнительное устройство.

Иные требования к ТП второй группы. Наличие в электромеханических приборах автоматического уравнивания высокочувствительного электронного усилителя смягчает требования к чувствительности ТП. Здесь, в первую очередь, от ТП требуется высокая линейность характеристики преобразования и точность; иначе теряет смысл применение в этих приборах метода уравнивающего преобразования.

С целью лучшего удовлетворения перечисленным требованиям, обычно ТП как первой, так и второй группы выполняют дифференциальными. Это позволяет: повысить чувствительность, расширить линейный участок характеристики преобразования, ослабить действие электромеханических сил на подвижную часть, уменьшить влияние внешних магнитных полей. Согласование нуля дифференциального ТП с нулем преобразуемого перемещения обеспечивается наличием двух выходных обмоток, включенных встречно. Невозможность выполнения совершенно одинаковыми как магнитных, так и электрических цепей двух половин дифференциальных ТП обуславливает наличие на выходе преобразователя некоторого начального напряжения, трудность регулировки и компенсации которого является, пожалуй, основным недостатком ТП.

В лаборатории электрических измерений механических величин кафедры «Электротехника и автоматика» Ленинаканского филиала ЕрПИ разработан новый класс ТП. Отличительной особенностью этих

преобразователей является выполнение магнитопровода в виде четырехплечевого магнитного моста, на одной диагонали которого намотана обмотка возбуждения, а на другой — единственная выходная обмотка. Предусматривая воздушные зазоры в диагоналях или плечах магнитного моста и помещая в них подвижные сердечники или короткозамкнутые витки, или же выполняя подвижной какую-либо часть магнитного моста, удалось создать несколько конструкций ТП линейных и угловых перемещений. Имея всего одну выходную обмотку, эти преобразователи обладают основным свойством дифференциальных ТП: имеют согласованную с нулем преобразуемого перемещения нуль, однако от них выгодно отличаются отсутствием начального напряжения на выходе. Последнее обусловлено тем, что при отсутствии преобразуемого перемещения магнитный мост уравнивается, в выходной диагонали отсутствует магнитный поток, и э.д.с. выходной обмотки равна нулю.

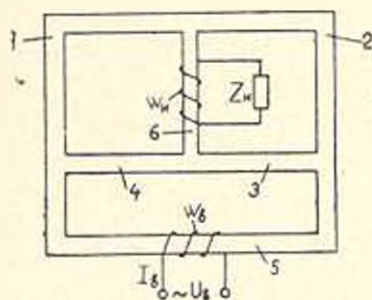


Рис. 1. Четырехплечий магнитный мост

В основе этих ТП лежит изображенный на рис. 1 четырехплечий магнитный мост с плечами 1, 2, 3, 4, со входной диагональю 5 и выходной диагональю 6. На входной диагонали намотана обмотка возбуждения W_v , подключенная к источнику переменного тока с напряжением U_v . На выходной диагонали намотана выходная обмотка W_n , к которой подключена нагрузка Z_n . Принципиальные схемы ТП с мостовыми магнитопроводами отличаются от схемы рис. 1 наличием воздушных зазоров либо в плечах, либо в диагоналях магнитного моста, в результате чего магнитные сопротивления соответствующих участков оказываются зависящими от преобразуемой механической величины. Целью данной статьи является установление основных соотношений для магнитной и электрических цепей ТП с мостовыми магнитопроводами, общих для всех конструкций, поэтому за основу берется схема рис. 1.

При синусоидальном изменении н.с. можно считать, что потоки во всех участках магнитопровода изменяются также по синусоидальному закону, так как в ТП магнитная индукция в магнитопроводе не должна выходить за пределы прямолинейного участка кривой намагничивания. Это позволяет при расчете использовать символический метод. Под действием переменных магнитных потоков в сердечнике возникают потери мощности на гистерезис и вихревые токи, в результа-

те чего на любом стальном участке магнитопровода переменный поток Φ отстает по фазе от переменной н.с. F , и потоки в различных участках магнитной цепи могут находиться в различных фазах. Поэтому целесообразно магнитное сопротивление стальных участков магнитной цепи рассматривать как комплексную величину [1]:

$$Z_M = \frac{\dot{F}}{\Phi} = R_M + jX_M = \rho_R \frac{l}{S} + j\rho_X \frac{l}{S} = \frac{l}{S} \rho_z e^{j\varphi_z} = z_M e^{j\varphi_M},$$

где R_M и X_M — активная и реактивная составляющие магнитного сопротивления;

ρ_R и ρ_X — удельное активное и реактивное магнитные сопротивления;

$$\rho_z = \sqrt{\rho_R^2 + \rho_X^2}$$

$z_M = \frac{l}{S} \rho_z$ и $\varphi_M = \arctg \frac{\rho_X}{\rho_R}$ — соответственно модуль и фаза комплексного магнитного сопротивления.

Участки магнитной цепи в виде воздушных зазоров создают только активное магнитное сопротивление, так как на этих участках отсутствуют потери на гистерезис и вихревые токи: $Z_M = R_M$. Согласно изложенному, составлена схема замещения магнитного моста (рис. 2), где через Z_{M1} , Z_{M2} , Z_{M3} и Z_{M4} обозначены магнитные сопротивления соответствующих плеч, через $Z_{M\delta}$ и $Z_{M\eta}$ — магнитные сопротивления соответственно входной и выходной диагоналей. В зависимости от конструкции преобразователя магнитное сопротивление $R_{M\delta}$ воздушного зазора может войти в какое-либо из указанных сопротивлений.

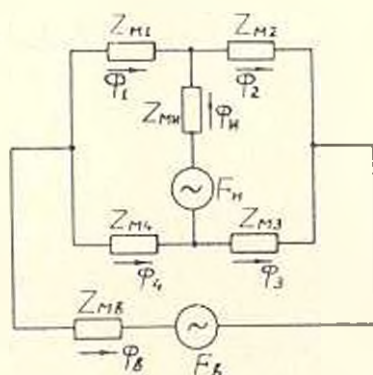


Рис. 2. Схема замещения магнитного моста

Рассмотрим случай $U_b = \text{const}$.

В режиме холостого хода, когда цепь выходной обмотки ω_n разомкнута, и выходной величиной преобразователя является э. д. с. E_n этой обмотки, магнитные потоки в диагоналях Φ_δ и Φ_η определяются следующими уравнениями:

$$\Phi_b = \frac{\dot{F}_{в.з.з.}}{N} [(Z_{м1} + Z_{м4})(Z_{м2} + Z_{м3}) + (Z_{м1} + Z_{м2} + Z_{м3} + Z_{м4})Z_{м0}] ;$$

$$\Phi_n = \frac{\dot{F}_{н.з.з.}}{N} (Z_{м1}Z_{м3} - Z_{м2}Z_{м4}) ; \quad (1)$$

где

$$\dot{F}_{в.з.з.} = \dot{I}_{в.з.з.} \omega_b ;$$

$\dot{I}_{в.з.з.}$ — ток обмотки возбуждения в режиме холостого хода;

$$N = Z_{м1}Z_{м2}(Z_{м3} + Z_{м4}) + (Z_{м1} + Z_{м2}) [Z_{м3}Z_{м4} + (Z_{м3} + Z_{м4})Z_{м0}] +$$

$$+ Z_{м0} [(Z_{м1} + Z_{м4})Z_{м2} + (Z_{м2} + Z_{м3})(Z_{м1} + Z_{м4} + Z_{м0})] .$$

Уравнение (1) показывает, что условие равновесия магнитного моста аналогично с условием равновесия моста переменного тока:

$$Z_{м1}Z_{м3} = Z_{м2}Z_{м4} .$$

Выходная э. д. с. преобразователя определяется потоком Φ_n :

$$\dot{E}_n = -j\omega_n \Phi_n \quad (2)$$

и также равна нулю, если магнитный мост уравновешен. В (2) $\omega = 2\pi f$ — круговая частота напряжения питающей сети.

Уравнение (2) описывает характеристику преобразования ТП в режиме холостого хода и позволяет определить его чувствительность в любой точке характеристики

$$K = \frac{dE_n}{dx} ,$$

где x — преобразуемое перемещение (при известной зависимости магнитного сопротивления соответствующего плеча моста от x).

Ток обмотки возбуждения

$$\dot{I}_{в.з.з.} = \frac{\dot{U}_b}{R_b + j\omega L_b} \quad (3)$$

в общем случае зависит от преобразуемой величины через комплексную индуктивность L_b обмотки возбуждения, определяемая уравнением

$$L_b = \frac{\omega_b^2}{N} [(Z_{м1} + Z_{м4})(Z_{м2} + Z_{м3}) + (Z_{м1} + Z_{м2} + Z_{м3} + Z_{м4})Z_{м0}] . \quad (4)$$

В уравнении (3) R_b — активное сопротивление обмотки возбуждения.

Рассмотренный режим холостого хода характерен для ТП второй группы, когда выходная э. д. с. E_n используется для компенса-

нии некоторого неизвестного напряжения или э. д. с. Для ТП первой группы характерен нагруженный режим работы. В некоторых случаях в нагруженном режиме могут оказаться также и ТП второй группы. Например, когда приходится использовать не всю выходную э. д. с., а часть ее, то к выходной обмотке подключается делитель напряжения.

При подключении к обмотке w_b нагрузки $Z_n = R_n + j\omega L_n$ через эту обмотку потечет ток I_n , режим работы преобразователя изменится, так как начнет сказываться размагничивающее влияние н. с. $F_n = I_n w_n$. Магнитные потоки в диагоналях моста будут определяться уравнениями:

$$\Phi_b = \frac{1}{N} \{ \dot{F}_b [(Z_{n1} + Z_{n2} Z_{n3} + Z_{n3}) + (Z_{n1} + Z_{n2} + Z_{n3} + Z_{n1}) Z_{n1}] - \\ - \dot{F}_n (Z_{n1} Z_{n3} - Z_{n2} Z_{n1}) \};$$

$$\Phi_n = \frac{1}{N} \left\{ \dot{F}_b (Z_{n1} Z_{n3} - Z_{n2} Z_{n1}) - \dot{F}_n [(Z_{n1} + Z_{n2})(Z_{n3} + Z_{n1}) + \right. \\ \left. + (Z_{n1} + Z_{n2} + Z_{n3} + Z_{n1}) Z_{n1}] \right\}.$$

Для определения токов преобразователя составим уравнения равновесия напряжений цепей обмоток w_b и w_n .

$$\dot{U}_b = I_b(R_b + j\omega L_b) + j\omega M \dot{I}_n; \\ 0 = j\omega M \dot{I}_b + \dot{I}_n [R_n + R_n + j\omega(L_n + L_n)], \quad (5)$$

где R_n и L_n — активное сопротивление и комплексная индуктивность выходной обмотки; M — комплексная взаимная индуктивность обмоток.

Из уравнений (5) определяются токи:

$$\dot{I}_b = \dot{U}_b \frac{R_n + R_n + j\omega(L_n + L_n)}{(R_b + j\omega L_b)[R_n + R_n + j\omega(L_n + L_n)] + \omega^2 M^2}, \\ \dot{I}_n = \dot{U}_b \frac{-j\omega M}{(R_b + j\omega L_b)[R_n + R_n + j\omega(L_n + L_n)] + \omega^2 M^2}. \quad (6)$$

В общем случае как $\dot{I}_n$, так и $\dot{I}_b$ зависят от преобразуемой величины, поскольку от последней зависят L_b , L_n и M . L_b определяется уравнением (4), а L_n и M связаны с параметрами цепи следующими уравнениями:

$$\dot{L}_n = \frac{\omega^2}{N} [(Z_{n1} + Z_{n2})(Z_{n3} + Z_{n1}) + (Z_{n1} + Z_{n2} + Z_{n3} + Z_{n1}) Z_{n1}];$$

$$M = \frac{w_1 w_2}{N} (Z_{m1} Z_{m3} - Z_{m2} Z_{m1}).$$

Поскольку для ТП, работающего в нагруженном режиме, выходной величиной является ток I_m , то уравнение (6) описывает характеристику преобразования $I_m = f(x)$ преобразователя и позволяет определить его чувствительность

$$K = \frac{dI_m}{dx}.$$

Ленинградский филиал ЕРПН

Получено 21 VIII 1973

Р. В. МАМОНДЯН

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԵՐԱՆՈՇՈՐԱՏՈՐԱՅԻՆ ՁԵՎԱՓՈԽԵԶՆԵՐԻ ՄԵԿ ԴԱՍԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԴՐՈՒՅՑՆԵՐԸ

Ա ճ փ օ փ ո լ մ

Հոդվածում ստացված են բնդհանուր բանաձևեր, որոնց միջոցով կարելի է կոտորել կամարդակային մագնիսառար ունեցող տարրեր տիպի տրանսֆորմատորային ձևափոխիչների հաշվարկ: Դիտված են ձևափոխիչների ինչպես պարապ բնթացրի, այնպես էլ բնռնափորման ուժթմնեքը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Буль Б. К. Основы теории и расчета магнитных цепей. М.—Л., «Энергия», 1964.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Г. Г. САРДАРЯН

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КОМБИНАЦИОННЫХ
СХЕМ ПО ОТНОШЕНИЮ К ОДИНОЧНЫМ СБОЯМ С УЧЕТОМ
ВАЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ

Известная оценка ненадежности (вероятности отказа) радиоэлектронной аппаратуры

$$q = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i), \quad (1.1)$$

определяемая по вероятности неисправной работы q_i отдельных ее узлов, для логических схем (ЛС) сильно завышена.

При расчете высоконадежных ЛС обычно учитывают только одиночные отказы. Тогда формула (1.1) упрощается, принимая вид

$$q = \sum_{i=1}^n q_i. \quad (1.2)$$

Но и эта оценка сильно завышена для ЛС, при анализе надежности которых появляется ряд специфических особенностей, которые не учтены в формуле (1.2). Так, не учитываются два характерных типа отказов: переходы $1 \rightarrow 0$ и $0 \rightarrow 1$, которые присущи логическим схемам. Совершенно не учитывается тот факт, что появившийся отказ элемента, воздействуя на последующие элементы, может «отфильтровываться», т.е. совпадать с правильной информацией или не проходить вообще.

Под отказом будем понимать сбой (ошибка) логического элемента с появлением инвертора на его выходе. Предположим, что вероятность сбоя постоянна во времени в заданном интервале работы комбинационной схемы (КС), сбой в отдельных элементах независимы, а распределение входных сигналов задано.

Такой подход к расчету надежности КС, основанный на указанных допущениях, предложен в работах [1÷4]. В работе [1] при помощи введенной передаточной матрицы КС кроме одиночных сбоев учитываются и всевозможные кратные сбои в схеме. Но сбой элементов принимаются однородными и отдельно не учитываются указанные переходы двух типов. В работах [2÷4] эти переходы учтены, при этом в [2] используется обратный анализ схемы. Расчет надежности КС в этих работах основан на аппарате вероятностной логики. Так, в [3] и [4] используется ОДНФ [5] функции, реализуемой одновыходной схемой.

Методы, основанные на применении вероятностной логики, при машинной реализации эффективны для сравнительно небольших схем. Для схем с большим числом входов и выходов при построении ОДНФ получаются громоздкие булевы формулы, и возрастает опасность ошибки как при составлении ОДНФ, так и при минимизации формул с целью получения попарно ортогональных термов. Кроме того, в случае большого числа входов машинный расчет ограничен объемом памяти [6]. К тому же, часто задаются вероятности не отдельных входных переменных схемы, а вероятности наборов значений всех входных переменных. В этом случае исключается возможность применения ОДНФ для расчета надежности схем.

В данной работе дается единая инженерная методика оценки надежности многовыходных КС (без петель ОС), основанная на применении логического моделирования цифровых схем на ЭВМ [7]. При этом устанавливается прямая зависимость ненадежности схемы от ненадежности элементов схемы и вероятностей появления входных наборов сигналов.

Вывод критерия надежности. Рассмотрим схему с m независимыми входами и M выходами.

Согласно [1], работа такой схемы исчерпывающе описывается передаточной матрицей

$$\|P\| = \|p_{cr}\|_{2^m, 2^M}, \quad (2.1)$$

где p_{cr} — вероятность получения r -го выходного набора двоичных сигналов, при условии, что на входы схемы поступает s -ый входной набор.

Размерность матрицы (2.1) сильно зависит от m и M , и уже при $m=7-8$ современные ЭВМ не в состоянии рассчитать такую матрицу, определяемую перемножением матриц так называемых 2 и 3 ступеней схемы [1]. Эта трудность остается и для одиночных сбоев схемы. Покажем, что в этом случае надежность схемы можно оценить при достаточно больших m и M , не прибегая к построению матрицы (2.1).

В каждой s -ой строке матрицы (2.1) только один элемент представляет вероятность того, что полученный выходной набор y_r — правильный. Все остальные элементы q_{cr} строки представляют вероятности ошибочных выходных наборов y_r схемы. Удалим из каждой строки матрицы вероятности правильных выходных наборов y_r . Получим матрицу $\|Q\|$, которую назовем квазиматрицей. Для одиночных сбоев схемы каждый элемент q_{cr} квазиматрицы $\|Q\|$ представляет сумму вероятностей сбоев некоторых (попарно отличающихся по номерам) логических элементов или равняется нулю. Ясно, что вероятность сбоя q_i данного i -го элемента может встречаться в каждой строке квазиматрицы не более одного раза. Для i -го элемента схемы вы-

делим все те строки квазиматрицы, которые содержат одну и ту же вероятность q_i . Отметим все такие строки. Перемножим q_i на сумму вероятностей p_{i_i} входных наборов схемы, соответствующих отмеченным строкам. Аналогичные произведения составляются для всех остальных элементов схемы. В результате вероятность ошибки хотя бы на одном выходе схемы в произвольный момент времени t (вероятность события A) определится как сумма

$$p_i(A) = q_i \sum_{i_i} p_{i_i} + \dots + q_i \sum_{i_i} p_{i_i} + \dots + q_n \sum_{i_n} p_{i_n}.$$

Но $\sum p_{i_i}$ — вероятность появления входных наборов, таких, что при совместном появлении каждого из них вместе со сбоем i -го элемента в момент времени t обуславливают ошибку хотя бы на одном выходе схемы. Иначе, это есть условная вероятность передачи сбоя (ошибки) на выход схемы. Каждая такая сумма разлагается на две подсуммы, являющиеся условными вероятностями передачи ошибки, когда имели место несовместные ошибочные переходы типа $1 \rightarrow 0$ и $0 \rightarrow 1$ на выходе i -го элемента.

Введем обозначения для этих подсумм:

$$\sum_{i_i} p_{i_i} = p(A/f_i = 1 \rightarrow f_i = 0); \quad \sum_{i_i} p_{i_i} = p(A/f_i = 0 \rightarrow f_i = 1),$$

где f_i — логический оператор, реализуемый i -ым элементом схемы. Назовем эти величины активностями i -го элемента по переходам $1 \rightarrow 0$ и $0 \rightarrow 1$ соответственно. Тогда по формуле полной вероятности будем иметь:

$$p(A) = \sum_{i=1}^n [p(f_i = 1 \rightarrow f_i = 0) \cdot p(A/f_i = 1 \rightarrow f_i = 0) + p(f_i = 0 \rightarrow f_i = 1) \cdot p(A/f_i = 0 \rightarrow f_i = 1)]. \quad (2.4)$$

Вводя новые обозначения:

$$(f_i = 1 \rightarrow f_i = 0) \sim f_i^{10}; \quad (f_i = 0 \rightarrow f_i = 1) \sim f_i^{01}; \quad q_i = p(f_i),$$

для вероятностей переходов обоих типов получим:

$$p(f_i^{10}) = p(\bar{f}_i) \cdot p(f_i^{10}/\bar{f}_i); \quad p(f_i^{01}) = p(\bar{f}_i) \cdot p(f_i^{01}/\bar{f}_i). \quad (2.5)$$

Определим условные вероятности $p(A/f_i^{10})$ и $p(A/f_i^{01})$, не прибегая к построению матрицы (2.1). Пусть P_j — оператор, реализуемый на j -ом выходе схемы, в которой произошёл сбой и i -ом элементе. После возникновения сбоя и i -ом элементе хотя бы на одном выходе схемы получится неправильный результат; если на выходе i -го элемента была

единица, и сбой оказался существенным; либо если на выходе i -го элемента был нуль, и сбой оказался существенным. Поэтому

$$p(A|f_i^{10}) = p(f_i = 1) \cdot p \left[\bigvee_{j=1}^M (F_j \oplus F_j \bar{f}_i) = 1 | f_i = 1 \right]. \quad (2.6)$$

$$p(A|f_i^{01}) = p(f_i = 0) \cdot p \left[\bigvee_{j=1}^M (F_j \oplus F_j \bar{f}_i) = 1 | f_i = 0 \right]. \quad (2.7)$$

После раскрытия условных вероятностей в правых частях (2.6) и (2.7) получим:

$$p(A|f_i^{10}) = p \left[\bigvee_{j=1}^M (F_j \oplus F_j \bar{f}_i) \cdot f_i = 1 \right]; \quad (2.8)$$

$$p(A|f_i^{01}) = p \left[\bigvee_{j=1}^M (F_j \oplus F_j \bar{f}_i) \cdot \bar{f}_i = 1 \right]. \quad (2.9)$$

Правые части (2.8) и (2.9) допускают упрощения.

Теорема.

$$p \left[\bigvee_{j=1}^M (F_j \oplus F_j \bar{f}_i) \cdot f_i = 1 \right] = p \left[\bigvee_{j=1}^M (F_j \oplus F_j f_i^{-0}) = 1 \right], \quad (2.10)$$

$$p \left[\bigvee_{j=1}^M (F_j \oplus F_j \bar{f}_i) \cdot \bar{f}_i = 1 \right] = p \left[\bigvee_{j=1}^M (F_j \oplus F_j f_i^{-1}) = 1 \right]. \quad (2.11)$$

Вкратце докажем справедливость (2.11) [аналогично доказывается и (2.12)]. Достаточно показать, что

$$(F_j \oplus F_j \bar{f}_i) \cdot \bar{f}_i = F_j \oplus F_j f_i^{-0} \quad (2.12)$$

для каждого $j = 1, 2, \dots, M$. Достаточность доказательства справедливости (2.12) вытекает из того, что если две функции алгебры логики равны, то и вероятности их обращения в единицу тоже равны (см. например, [4]). Преобразуем левые и правые части (2.12). Представим F_j , $F_j \bar{f}_i$ и $F_j f_i^{-0}$ при помощи суперпозиции от f_i и входных переменных схемы. После представления обеих частей выражения (2.12) в ДНФ, разложения функций F_j и $F_j \bar{f}_i$ по переменным f_i и $\bar{f}_i$ и выполнения всевозможных упрощающих операций булевой алгебры для обеих частей получаем одно и то же выражение:

$f_i [F_j(x_1, x_2, \dots, x_s, \dots, 1, \dots, x_m) \oplus F_j(x_1, x_2, \dots, x_s, \dots, 0, \dots, x_m)]$, где $x_1, x_2, \dots, x_m$ — входные переменные схемы; константы 1 и 0 — значения логического оператора f_i i -го элемента схемы.

Составим выражения вида

$$\bigvee_{j=1}^M \left[F_j(X_c) \oplus F_j f_i^{-0}(X_c) \right] ; \bigvee_{j=1}^M \left[F_j(X_c) \oplus F_j f_i^{-1}(X_c) \right]. \quad (2.13)$$

принимающие значения из множества $\{0, 1\}$. Здесь $F_j(X_c)$ — значение функции j -го выхода схемы на c -м входном наборе X_c , а $F_{j/i=0}(X_c)$ и $F_{j/i=1}(X_c)$ — значения функции j -го выхода схемы, когда на выходе i -го элемента схемы зафиксированы 0 и 1 соответственно.

Методы логического моделирования цифровых схем на ЭВМ [7] позволяют для достаточно больших схем при всевозможных входных наборах X_c вычислить выражения (2.13) простым алгоритмом.

Вероятности обращения в единицу функций различности, указанных в квадратных скобках правых частей равенств (2.10) и (2.11), определяются как математические ожидания значений (2.13) этих функций на всевозможных входных наборах схемы:

$$p \left[\bigvee_{j=1}^M (F_j \oplus F_{j/i=0}) = 1 \right] = \sum_{c=0}^{2^m-1} p_c \cdot \bigvee_{j=1}^M [F_j(X_c) \oplus F_{j/i=0}(X_c)], \quad (2.14)$$

$$p \left[\bigvee_{j=1}^M (F_j \oplus F_{j/i=1}) = 1 \right] = \sum_{c=0}^{2^m-1} p_c \bigvee_{j=1}^M [F_j(X_c) \oplus F_{j/i=1}(X_c)]. \quad (2.15)$$

Принимая, что сброс элементов (переходы двух типов) симметричны, будем иметь

$$p(f_i^{(0)}/\bar{f}_i) = p(f_i^{(1)}/\bar{f}_i) = \frac{1}{2} \quad \text{и из (2.4), (2.5), (2.8), (2.9), (2.10),}$$

(2.11), (2.14) и (2.15) получаем

$$p(A) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i (\eta_{i=0} + \eta_{i=1}), \quad (2.16)$$

где через $\eta_{i=0}$ и $\eta_{i=1}$ обозначены активности i -го элемента, представленные в правых частях (2.14) и (2.15). Величину $\eta = \eta_{i=0} + \eta_{i=1}$ назовем коэффициентом важности i -го элемента при заданном законе распределения входных наборов схемы. Из (2.14) и (2.15) легко усмотреть, что $\eta \leq 1$.

Сравним оценки (1.2) и (2.16). Коэффициент

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \eta_i}$$

с учетом соотношения $\eta \leq 1$ показывает, что для симметричных сбросов оценка (1.2) завышена в два и более раза, т. е. $k \geq 2$. Для реальных многоэлементных схем обычно $k \gg 2$, причем, для схем с большой глубиной $k \gg 2$. А если считать, что сброс элементов однородны (как в работе [1]), т. е.

$$p(f_i^{(0)}) = p(f_i^{(1)}) = p(\bar{f}_i),$$

то тогда

$$p_i(A) = \sum_{i=1}^k q_i \gamma_i \quad (2.17)$$

и $k_1 = 2$.

Заметим, что γ_{i-0} и γ_{i-1} не зависят от очередности подачи двоичных наборов на входы КС. Поэтому в памяти ЭВМ достаточно предварительно хранить лишь один набор (нулевой), а остальные получать каждый раз, прибавляя единицу к младшему разряду предыдущего набора. Этот искусственный прием эффективен для экономии памяти ЭВМ.

Выявление „узких“ мест в КС. Полученный критерий анализа надежности КС позволяет провести анализ надежности схемы по частям, т. е. поэлементно. Это позволяет решать задачу нахождения „узких“ мест в КС. Пусть имеем фиксированное разделение схемы S на подсхемы, которые будем условно называть блоками. С конструкторской позиции блоками схемы S могут быть функциональные узлы различной детализации вплоть до отдельных логических элементов (элементы, ячейки, модули и т. д.) [8]. Требуется определить наиболее „опасные“ блоки [9], выявить влияние каждого из блоков на общую надежность схемы.

Проиллюстрируем решение задачи на примере схемы основанной на рис. 1. Схема состоит из 5 блоков (на уровне модулей). Входные наборы схемы равновероятны: $p_0 = p_1 = p_2 = \dots = p_{255} = \frac{1}{256}$.

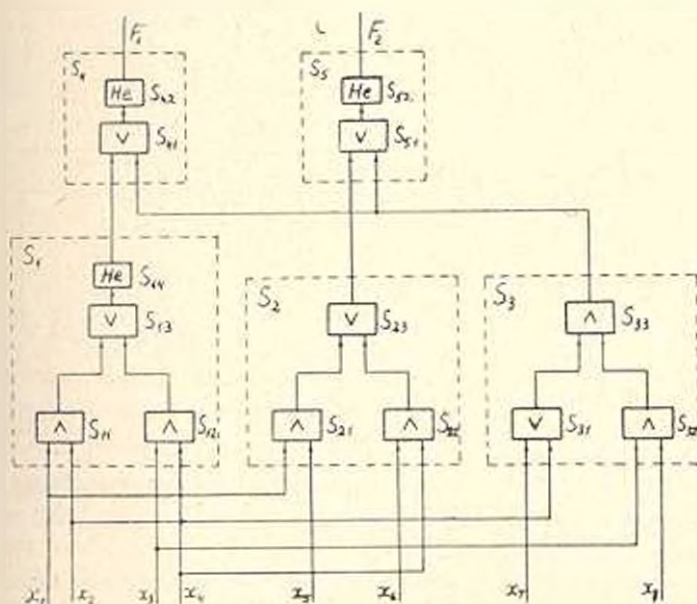


Рис. 1

Значения активностей элементов блоков*, рассчитанные по формулам (2.14) и (2.15), приведены в табл. 1.

Предположим, что элементы схемы равнонадежны и каждый имеет вероятность сбоя, равную ε . При помощи табл. 1 и по формулам (1.2), (2.17) и (2.16) определяем как ненадежность схемы по отдельным ее блокам, так и ненадежность схемы в целом. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Значения коэффициентов завышенности оценок (1.2) и (2.17) по сравнению с оценкой (2.16) также приведены в табл. 2 (строки 4 и 5).

Таблица 1

S_1		S_2		S_3		S_4		S_5	
γ_{11-0}	γ_{11-1}	γ_{21-0}	γ_{21-1}	γ_{31-0}	γ_{31-1}	γ_{41-0}	γ_{41-1}	γ_{51-0}	γ_{51-1}
40	128	9	27	34	10	176	80	21	235
256	256	256	256	256	256	256	256	256	256
γ_{12-0}	γ_{12-1}	γ_{22-0}	γ_{22-1}	γ_{32-0}	γ_{32-1}	γ_{42-0}	γ_{42-1}	γ_{52-0}	γ_{52-1}
40	128	9	27	34	74	80	176	235	21
256	256	256	256	256	256	256	256	256	256
γ_{13-0}	γ_{13-1}	γ_{23-0}	γ_{23-1}	γ_{33-0}	γ_{33-1}				
80	128	21	27	34	118				
256	256	256	256	256	256				
γ_{14-0}	γ_{14-1}								
128	80								
256	256								

Таблица 2

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S
q	1ε	3ε	3ε	2ε	2ε	14ε
$\mu_3(A)$	2,938ε	0,468ε	1,188ε	2ε	2ε	4,594ε
$\rho(A)$	1,469ε	0,234ε	0,594ε	ε	ε	2,297ε
k	2,72	12,82	5,05	2	2	6,09
β_1	2	2	2	2	2	2

Из табл. 2 видно, что наиболее "узкими" местами схемы являются блоки S_1 , S_4 и S_5 . Для повышения надежности схемы необходимо, и в первую очередь, производить логическое резервирование этих узлов. Заметим, что без учета структурно-функциональных характеристик элементов схемы наиболее "безопасный" блок S_2 по ошибке

* Расчет производился при помощи логического моделирования схемы на ЭВМ Раздан-3 с применением АЛГОЛ-60. Из-за ограниченности объема работы моделирующий алгоритм не приводится.

рассматривался бы как один из наиболее «опасных» блоков, а из числа наиболее «опасных» — блоки S_4 и S_5 как наиболее «неопасные». Эти выводы, однако, заранее далеко не очевидны.

Выводы

Дается метод оценки надежности КС, основанный на применении логического моделирования цифровых схем на ЭВМ и удобный для инженерного расчета.

Показано, что для любого момента времени t при симметричных одиночных сбоях схемы эта оценка более чем в два раза точнее принятой в радиоэлектронной аппаратуре оценки и два раза точнее оценки, приведенной в работе [1].

При помощи предлагаемого метода решается задача выявления «узких» мест в схеме. На конкретном примере показано, что оценка (1.2) в общем случае не пригодна для решения этой задачи, так как более «опасные» блоки по этой оценке часто могут быть классифицированы как более «неопасные» и наоборот.

ЕрПН им К. Маркса

Поступило 3.VII.1973.

Հ. Հ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ԿՈՄԲԻՆԱՑԻՈՆ ՍԵՆՏԱՆՆԵՐԻ ՀՈՒՍԱՂՎՈՐԹՅԱՆ ԿԵՍՉՍՏՈՒՄԸ ՄԵՐԱՆԻ ՍԵՐԱՆՆԵՐԻ ՆԿԱՏՄԱՄԸ ՀԱՇՎԻ ԱՌԱՋ ՍԵՆՏԱՆԻ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ԿԱՐԿԼՈՐԴԻՑՈՒՄԸ:

Ա. մ. փ. փ. փ. փ.

Տրվում է կոմբինացիոն տրամաբանական սխեմաների հուսալիությունը գնահատելու մեթոդ, որը հիմնված է էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենաների վրա թվային սխեմաների տրամաբանական մոդելավորման սկզբունքի վրա և հարմար ինժեներական հաշվարկման համար: Լուծվում է սխեմայում գնեղ տեղերը գտնելու խնդիրը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин В. И. Вероятностный анализ комбинационных схем и их надежность. «Изв. АН СССР. Техническая кибернетика», 1964, № 6.
2. Левин В. И. Анализ логических схем с высоконадежными элементами. «Автоматика и телемеханика», 1970, № 6.
3. Цулинзе Ю. Л., Асатиани Г. Г. Оценка надежности комбинационных логических схем по отношению к одиночным сбоям. «Автоматика и вычислительная техника», 1968, № 6.
4. Малюгин В. Д. Один метод расчета надежности одноклапных схем. В кн.: Вычислительные системы, 1964, вып. 13, Новосибирск, Изд. СО АН СССР.
5. Меркин Ю. В. Решение задач вероятностного расчета одноклапных схем методом ортогонализации. В кн. «Вычислительные системы», 1963, вып. 5.
6. Меркин Ю. В., Макаров С. В. и др. Логико-вероятностные методы анализа струк-

группой надежности. Отчет по теме А-XXII-1228 (Новосибирск, институт математики СО АН СССР).

7. Лошников В. Н., Былова Г. Г. Логическое моделирование цифровых устройств. В сборнике «Применение вычислительных машин для проектирования цифровых устройств». Изд. «Советское радио», 1968.
8. Матнихин Н. Я. Автоматизация проектирования цифровых устройств. В том же сборнике.
9. Сардарян Г. Г. К вопросу определения «веса» блоков логических устройств. Тезисы докладов 20-ой научно-технической конференции ЕрПИ. Ереван, 1973, стр. 144—145.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

К. Х. ШАХБАЗЯՆ, Д. А. ДЖАԳՍԻԱՆԻԱՆ

ОБ ОДНОМ АНАЛИТИЧЕСКОМ МЕТОДЕ СИНТЕЗА ПРИБЛИЖЕННЫХ ПРЯМИХ

Для воспроизведения любой непрерывной плоской кривой по условию касания до пятого порядка практически можно использовать различные точки шатунной плоскости шарнирного четырехзвенника. Однако, прямое решение задачи синтеза [1, 3] с вычислением всех неизвестных параметров схемы механизма является довольно сложным, а полученные результаты могут оказаться неудовлетворительными. С этой точки зрения, решения задачи синтеза прямолинейно направляющего механизма целесообразнее вести при наперед заданных основных размерах схемы механизма; при этом оно сводится к отысканию положения шатунной точки, воспроизводящей приближенную прямую. Такое решение оказывается достаточно простым, так как подлежат определению два параметра схемы механизма, определяющие положение искомой шатунной точки.

Преимущество решения задачи синтеза в указанной постановке состоит в том, что выбор задаваемой схемы предопределяет выполнение ряда дополнительных конструктивных, кинематических и динамических требований.

С математической точки зрения имеем интерполяционную задачу с наперед заданными узлами интерполяции. Узлы интерполяции определяются точками совпадения шатунной кривой механизма с кривой заданного вида (с прямой) в заданных положениях механизма. Подобные задачи решены К. С. Ивановым [2] методом обращения движения.

Пусть задана кинематическая схема четырехзвенника A_0ABV (рис. 1) с основными размерами $A_0A=1$, $AB=l$, $VB_0=r$ и $A_0B_0=d$. Положение чертящей точки M в плоскости шатуна определится отрезками m и n , соответственно откладываемые от центра шарнира A по оси шатуна AB и от конца отрезка m перпендикулярно ей.

Положение точки M относительно неподвижной системы координат uA_0x определяется следующими координатами (начало координатной системы совпадает с центром шарнира A_0 , а ось абсцисс A_0x совпадает со стойкой A_0B_0):

$$x = \cos \varphi + m \cos \alpha - n \sin \alpha; \quad (1)$$

$$y = \sin \varphi + m \sin \alpha + n \cos \alpha. \quad (2)$$

где

φ — угол между звеньями A_0A и A_0B_0 (обобщенная координата);

α — угол между звеньями AB и A_0B_0 (ось A_0x).

Уравнение прямой, на которой, при заданных положениях φ_i , должна находиться чертящая точка шатуна M , будет

$$y = kx + b, \quad (3)$$

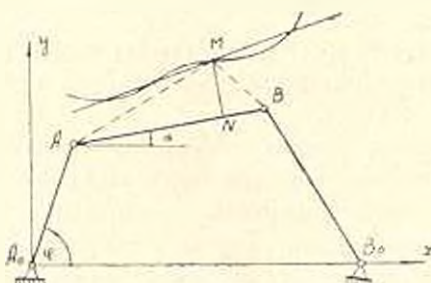


Рис. 1

Используя (1) и (2), получим:

$$\sin\varphi + m\sin\alpha + n\cos\alpha = k(\cos\varphi + m\cos\alpha - n\sin\alpha) + b. \quad (4)$$

В выражение (4) входят четыре параметра, подлежащие определению. Следовательно, задача решима при четырех заданных положениях механизма:

$$\begin{cases} \sin\varphi_1 + m\sin\alpha_1 + n\cos\alpha_1 = k(\cos\varphi_1 + m\cos\alpha_1 - n\sin\alpha_1) + b, \\ \sin\varphi_2 + m\sin\alpha_2 + n\cos\alpha_2 = k(\cos\varphi_2 + m\cos\alpha_2 - n\sin\alpha_2) + b, \\ \sin\varphi_3 + m\sin\alpha_3 + n\cos\alpha_3 = k(\cos\varphi_3 + m\cos\alpha_3 - n\sin\alpha_3) + b, \\ \sin\varphi_4 + m\sin\alpha_4 + n\cos\alpha_4 = k(\cos\varphi_4 + m\cos\alpha_4 - n\sin\alpha_4) + b. \end{cases} \quad (5)$$

Решая систему (5) путем последовательного исключения параметров k , b , $m(n)$, получим квадратное уравнение относительно n (m). При этом корни этого уравнения обязательно должны быть совпадающими.

Решим систему (5) иным методом. После соответствующих преобразований и обозначений имеем:

$$\begin{cases} \sin\varphi_1 + P_0\sin\alpha_1 + P_1\cos\alpha_1 + P_2\cos\varphi_1 + P_3 = 0; \\ \sin\varphi_2 + P_0\sin\alpha_2 + P_1\cos\alpha_2 + P_2\cos\varphi_2 + P_3 = 0; \\ \sin\varphi_3 + P_0\sin\alpha_3 + P_1\cos\alpha_3 + P_2\cos\varphi_3 + P_3 = 0; \\ \sin\varphi_4 + P_0\sin\alpha_4 + P_1\cos\alpha_4 + P_2\cos\varphi_4 + P_3 = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$P_0 = m + kn; \quad P_1 = n - km; \quad P_2 = -k; \quad P_3 = -b.$$

После вычисления коэффициентов P_0, P_1, P_2 и P_3 из системы линейных уравнений (6) определяем параметры:

$$m = \frac{P_0 - P_1 k}{1 + k^2}; \quad n = \frac{P_0 k + P_1}{1 + k^2}; \quad k = -P_2; \quad b = -P_3. \quad (7)$$

Длины сторон AM и BM шатунного треугольника AMB определяются как гипотенузы прямоугольных треугольников AMN и BMN :

$$AM = \sqrt{m^2 + n^2}; \quad BM = \sqrt{(l - m)^2 + n^2}. \quad (8)$$

Длина прямолинейного участка определяется по формуле:

$$L = \sqrt{[\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2 + m(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) - n(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)]^2 + [\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2 + m(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) + n(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)]^2}. \quad (9)$$

Отклонение траектории чертящей точки M от прямолинейности в любом положении механизма определится как расстояние точки M от прямой (3):

$$\Delta = \frac{k(\cos \varphi_i + m \cos \alpha_i - n \sin \alpha_i) - \sin \varphi_i - m \sin \alpha_i - n \cos \alpha_i - b}{\sqrt{1 + k^2}}.$$

Качество воспроизводимой приближенной прямой будем характеризовать величиной

$$\Delta_{\text{max}} = \frac{\Delta}{L}. \quad (11)$$

Шарнир B_0 можно и не расположить на оси A_0x . Это обстоятельство учитывается при вычислении угла между шатуном AB и осью A_0x :

$$\alpha_i = \alpha_i + \theta, \quad \text{где } \theta = \arctg \frac{y_0}{x_0}.$$

Для иллюстрации предлагаемого аналитического метода отыскания на шатунной плоскости четырехшарнирного механизма точки, находящейся в четырех наперед заданных положениях на прямой, решим числовой пример.

Для четырехзвенного механизма [3] с параметрами $AB = l = 1.65$; $BB_0 = r = 1.283$; $A_0B_0 = d = 2.16417$; $x_B = 2.0656$; $y_B = 0.6457$ при заданных углах поворота ($\varphi_1 = 143^\circ 23'$, $\varphi_2 = 112^\circ 07'$, $\varphi_3 = 90^\circ$, $\varphi_4 = 54^\circ 25'$) определить параметры m, n, k, b .

Имея параметры схемы механизма, определение углов α_i соответствующих φ_i , не представляет трудности: $\alpha_1 = 11^\circ 33'$, $\alpha_2 = 22^\circ 05'$, $\alpha_3 = 28^\circ 01'$, $\alpha_4 = 41^\circ 25'$.

По выражениям (6) и (7) определяются коэффициенты P_0, P_1, P_2, P_3 и параметры m, n, k, b :

$$\begin{aligned}
 P_0 &= -3,926506; & P_1 &= -7,431885; & P_2 &= -0,082940; \\
 P_3 &= 7,407990; & m &= -3,287575; & n &= -7,707529; \\
 k &= 0,082940; & b &= -7,407990.
 \end{aligned}$$

Координаты узловых точек (точки пересечения шатунной кривой с прямой приближения) вычисляем по формулам (1) и (2):

$$\begin{aligned}
 x_1 &= -2,4809; & x_2 &= -0,5263; & x_3 &= 0,7180; & x_4 &= 3,2150; \\
 y_1 &= 7,6136; & y_2 &= -7,4516; & y_3 &= -7,3485; & y_4 &= -7,1415.
 \end{aligned}$$

Стороны шатунного треугольника ABM вычисляем по формуле (8):

$$AM = 8,379594; \quad BM = 9,153638.$$

Длина прямоугольного участка определится по формуле (9)

$$l = 5,778.$$

Максимальные отклонения, вычисляемые по формулам (10) и (11), траектории чертящей точки M от прямой (3), получаются:

$$\Delta_1 = -0,0029; \quad \Delta_{1\text{отн}} = 0,0005 \quad (\text{при } x = -1,0619; \quad y = -7,4896);$$

$$\Delta_2 = -0,0040; \quad \Delta_{2\text{отн}} = 0,0007 \quad (\text{при } x = 0,3137, \quad y = -7,3779);$$

$$\Delta_3 = +0,0045; \quad \Delta_{3\text{отн}} = 0,0008 \quad (\text{при } x = 1,6985; \quad y = -7,2728).$$

Схема полученного механизма изображена на рис. 2.

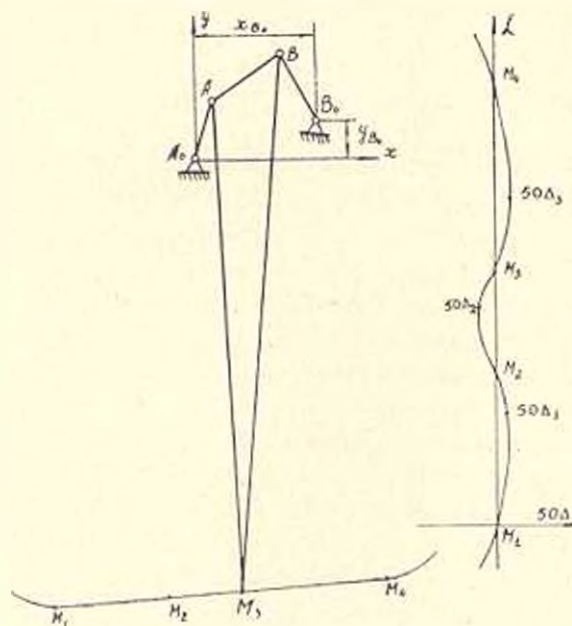


Рис. 2

Կ. Խ. ՇԱՀՐԱՋՅԱՆ, Գ. Ա. ԶԱՂԱՅՊԱՆՅԱՆ

ՄՈՏՈՒՄ ՈՒՂԱԳԻՄ — ՈՒՂԱՐՐԻ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ՍԻՆԹԵԶԻՄԱՆ ՄԵ ԱՆԱՎԵՏԻԿ
ՄԵԹՈԴԻ ՄԱՍԻՆ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Հողվածում տրված է քառոցակ հոդակապային մեխանիզմի շարժաթևին պատկանող և մոտավոր ուղիղ դիժ պժող կետի դիրքի որոնման անալիտիկ մեթոդ, երբ նախապես հայտնի են մեխանիզմի հիմնական շափերն ու շորս դիրքերը: Լուծված է մասնավոր օրինակ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Артоболевский Н. И., Левитский Н. И., Черкудинов С. А. Синтез плоских механизмов. Физматгиз, М., 1959.
2. Ишмаев К. С. Метод метрического синтеза направляющих механизмов на основе обращения движения. Диссертация, Алма-Ата, 1970.
3. Таирян В. М. Синтез рычажных механизмов по положениям шатуновой плоскости и критерием качества передачи сил. Диссертация, Ереван, 1970.

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

М. А. ЗАДОЯН

О ПРИМЕНЕНИИ ВАРНАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ТЕОРИИ
ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В теории расчета железобетонных элементов в упругой стадии наряду с прямыми способами успешно применяются и варнационные методы, позволяющие во многих случаях находить наиболее эффективные решения задачи. В расчетах статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом ползучести бетона эти варнационные способы пока не заняли должного места, как это имеет место в упругих расчетах.

В данной статье приводится некоторое обобщение и приложение формулы Кастильяно для железобетонной балки с учетом наследственной ползучести бетона.

Принимается, что железобетонная балка работает в стадии, когда трещины отсутствуют. Для простоты рассматриваем балку с прямоугольным поперечным сечением с двусторонним симметричным армированием.

Будем исходить из наследственной теории ползучести Маслова-Арутюняна [1] и из основных гипотез, принятых в теории расчета железобетона [1—6] и др. Между напряжением и деформацией в бетоне имеется зависимость

$$E\varepsilon(t) = \sigma(t) + \int_0^t \sigma(\tau) K(t, \tau) d\tau, \quad (1)$$

Здесь модуль мгновенной деформации бетона принимается постоянным (осредненным)

$$K(t, \tau) = -E \frac{\partial}{\partial \tau} \varphi(\tau) [1 - e^{-\beta(t-\tau)}], \quad \varphi(\tau) = \frac{A_1}{\tau} + C_0. \quad (2)$$

Материал арматуры считаем идеально упругим с модулем упругости E_1 .

Из условий равновесия имеем (рис. 1)

$$\int_{-h}^h b \sigma dz + (z_1 + z_2) F_1 = N, \quad \int_{-h}^h b \sigma z dz + (z_1 - z_2) F_1 h = M, \quad (3)$$

где N и M — нормальная сила и изгибающий момент в сечении x , σ_1 и σ_2 — напряжения соответственно в нижней и верхней арматуре, F_1 — площадь поперечного сечения каждого слоя арматуры.

Принимая гипотезу плоских сечений, будем иметь $\varepsilon = \varepsilon_0 + \chi z$, где ε — соответственно относительное удлинение и кривизна нейтрального слоя балки.

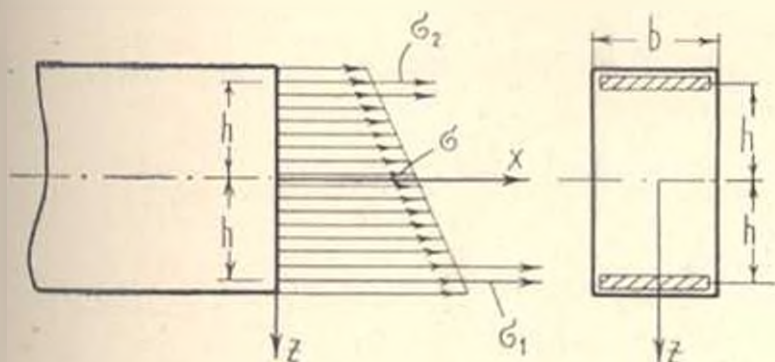


Рис. 1.

Используя условие равновесия (3), соотношения между напряжениями и деформацией в бетоне (1) и в арматурах

$$\sigma_1, \sigma_2 = E_s(\varepsilon_0 + \chi h) \quad (4)$$

и вводя обозначения $\nu = 2E_s F_1 / EF$, $F = 2bh$, $J = \frac{2}{3}bh^3$, получим

$$\varepsilon_0 = \frac{N}{EF} - \nu \varepsilon_0 + \int \left| \frac{N}{EF} - 3\chi z \right| K(t, z) dz, \quad (5)$$

$$\chi = \frac{M}{EJ} - 3\nu\chi + \int \left| \frac{M}{EJ} - 3\nu\chi \right| K(t, z) dz. \quad (6)$$

Для решения интегрального уравнения (5) относительно ε_0 удобно ввести новую неизвестную функцию

$$\varphi(x, t) = \frac{N(x, t)}{EF} - \varepsilon_0(x, t). \quad (7)$$

Тогда из (5) приходим к следующему интегральному уравнению:

$$\varphi(x, t) = \frac{\nu N(x, t)}{EF} - \beta \int \varphi(x, z) K(t, z) dz, \quad (8)$$

где $\alpha = 1/(1 + \nu)$, $\beta = \nu/(1 + \nu)$. Решение уравнения (8) представится в виде

$$\dot{\varphi}(x, t) = \frac{zN(x, t)}{EF} - \int_0^t \frac{zN(x, \tau)}{EF} R(t, \tau) d\tau, \quad (9)$$

где $R(t, \tau)$ — резольвента ядра $K(t, \tau)$

$$R(t, \tau) = \gamma(\tau) - \gamma D(\tau) \int_0^t e^{-\int_\tau^t \gamma(\xi) d\xi} d\xi, \quad (10)$$

$$\gamma(\tau) = \gamma[1 + \beta E z(\tau)], \quad D(\tau) = \gamma'(\tau) + \gamma^2(\tau) - \gamma z(\tau).$$

Подставляя (9) в (7), находим

$$\dot{z}_0(x, t) = \frac{zN(x, t)}{EF} + \int_0^t \frac{\lambda N(x, \tau)}{EF} R(t, \tau) d\tau, \quad (11)$$

где $\lambda = \alpha/\nu$. Аналогичным образом из (7) находим

$$\dot{z}(x, t) = \frac{z_1 M(x, t)}{EJ} + \int_0^t \frac{\lambda_1 M(x, \tau)}{EJ} R_1(t, \tau) d\tau, \quad (12)$$

где $z_1 = 1/1 + 3\nu$, $\lambda_1 = 3\nu/1 + 3\nu$, а значение $R_1(t, \tau)$ определяется по формулам (10) заменой β через $3\nu z_1$.

Напряжения в арматурах будут

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{matrix} \right\} = \frac{zN}{F} \pm \frac{z_1 M}{W} + \int_0^t \left[\frac{\lambda N}{F} R \pm \frac{\lambda_1 M}{W} R_1 \right] d\tau, \quad (13)$$

где $W = J/h$.

Учитывая линейность распределения напряжения по высоте поперечного сечения в бетоне, можно вывести формулы для напряжений в бетоне в нижних и верхних краях поперечного сечения

$$\left. \begin{matrix} \sigma_n \\ \sigma_n \end{matrix} \right\} = \frac{zN}{F} \pm \frac{z_1 M}{W} + \int_0^t \left[\frac{\lambda N}{F} R \pm \frac{\lambda_1 M}{W} R_1 \right] d\tau, \quad (14)$$

Пусть под внешними силами рассматриваемая железобетонная балочная система находится в равновесии. Наряду с истинными нормальными силами $N(x, t)$ и изгибающими моментами $M(x, t)$ в момент t рассмотрим и другие возможные распределения нормальных сил и изгибающих моментов $N(x, t) + \delta N(x, t)$, $M(x, t) + \delta M(x, t)$, бесконечно близкие к реальному и удовлетворяющие уравнению равновесия и граничным условиям. В рассматриваемый момент t вариации δN и δM составляют уравновешенную систему. Тогда сумма работ вариаций δN , δM и вариаций внешних сил равна нулю

$$\int_0^l [\varepsilon_0 \delta N + \kappa \delta M] dx = \sum_{k=1}^n \bar{w}_k(t) \delta P_k(t). \quad (15)$$

Здесь $P_k(t)$ и $w_k(t)$ — обобщенные силы и обобщенные перемещения. Подставляя (11) и (12) в (15), находим

$$\int_0^l \left\{ \frac{\alpha_1 N^2(x, t)}{2EF} + \frac{\alpha_1 M^2(x, t)}{2EJ} + \int_0^t \left[-\frac{\lambda N(x, \tau)}{EF} N(x, t) R(t, \tau) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\lambda_1 M(x, \tau)}{EJ} M(x, t) R_1(t, \tau) \right] d\tau \right\} dx - \sum_{k=1}^n w_k(t) \lambda P_k(t). \quad (16)$$

Отсюда для обобщенного перемещения под обобщенной силой находим

$$w_k(t) = \int_0^l \left\{ \frac{\alpha N(x, t)}{EF} + \int_0^t \frac{\lambda N(x, \tau)}{EF} R(t, \tau) d\tau \right\} \frac{\partial N(x, t)}{\partial P_k(t)} dx + \\ + \int_0^l \left\{ \frac{\alpha M(x, t)}{EJ} + \int_0^t \frac{\lambda_1 M(x, \tau)}{EJ} R_1(t, \tau) d\tau \right\} \frac{\partial M(x, t)}{\partial P_k(t)} dx.$$

Полученная формула выражает теорему Кастильяно для рассматриваемой железобетонной балочной системы [7, 8].

С целью иллюстрации рассмотрим один раз статически-неопределенную систему (фиг. 2а). Горизонтальная железобетонная балка, находящаяся под воздействием равномерно распределенной нагрузки с интенсивностью $q(t)$, поддерживается вертикальным металлическим стержнем. Для нахождения неизвестной реакции $H(t)$ имеем уравнение

$$\int_0^l \left\{ \frac{\alpha_1 M_1(x, t)}{EJ} + \int_0^t \frac{\lambda_1 M_1(x, \tau)}{EJ} R_1(t, \tau) d\tau \right\} \frac{\partial M_1(x, t)}{\partial H(t)} dx + \\ + \frac{N_2(t) l_2}{E_2 F_2} \frac{\partial N_2(t)}{\partial H(t)} = 0. \quad (18)$$

Подставляя в (18)

$$M_1(x, t) = -\frac{q(t)x^2}{2} + H(t)x, \quad N_2(t) = H(t) \quad (19)$$

и вводя обозначения

$$\frac{3}{\alpha_1} \frac{EJ}{E_2 F_2} \frac{l_2}{l_1^3} = \nu, \quad \frac{3}{8} q(t)l - \chi(t) = H(t), \quad (20)$$

где $\chi(t)$ — новая неизвестная функция, получим

$$\chi(t) = f(t) - \nu_1 \int_0^t \chi(\tau) R_1(t, \tau) d\tau. \quad (21)$$

Здесь

$$f(t) = \frac{3}{8} \frac{n}{1+n} q(t) l, \quad \mu_1 = \frac{1}{1+n}. \quad (22)$$

Преобразованием и дифференцированием (21) приводится к дифференциальному уравнению

$$\chi''(t) + \mu_1(t)\chi'(t) = f''(t) + \mu_1(t)f'(t) \quad (23)$$

с начальными условиями

$$\chi(\tau_1) = f(\tau_1), \quad \chi'(\tau_1) = f'(\tau_1) - \mu_1[\tau_1]\chi(\tau_1) - \mu_1 f(\tau_1). \quad (24)$$

Решение уравнения (23) при условиях (24) представится в виде

$$\chi(t) = f(t) - \int_{\tau_1}^t f(\tau) R_*(t, \tau) d\tau, \quad (25)$$

где $R_*(t, \tau)$ — резольвента ядра $-\mu_1 R_1(t, \tau)$

$$R_*(t, \tau) = \mu_1(\tau) - \mu_1(\tau) - D_1(\tau) \int_{\tau}^t e^{-\int_{\tau}^t \mu_1(\xi) d\xi} d\tau, \quad (26)$$

$$\mu_1(\tau) = (1 + \mu_1)\mu_1(\tau) - \mu_1 \mu_1, \quad D_1 = \mu_1' - \mu_1' + \mu_1^2 - \mu_1 \mu_1.$$

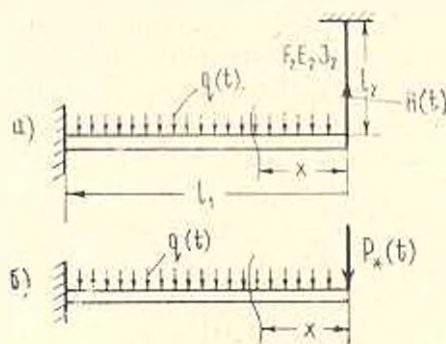


Рис. 2

Подставляя (25) в выражение $H(t)$ (20), получим

$$H(t) = \frac{3}{8} \frac{q(t) l_1}{1+n} \left[1 + n \int_{\tau_1}^t \frac{q(\tau)}{q(t)} R^*(t, \tau) d\tau \right]. \quad (27)$$

В случае постоянного q и старого бетона ($\mu(\tau) = \text{const}$) находим

$$H(t) = \frac{3ql}{8(1+n)} \left[1 + \frac{\mu_1(\eta - \tau_1)}{\eta} \left[1 - e^{-\mu_1(\eta - \tau_1)} \right] \right]. \quad (28)$$

Прогиб балки в узловой точке будет $w(t) = H(t) l_1 / E_s F_s$.

В сечениях, где не приложена сосредоточенная сила (момент) прогиб (угол поворота) определяется методом введения добавочной

силы. Пусть железобетонная балка изгибается под воздействием равномерно распределенной нагрузки $q(t)$ и требуется определить прогиб свободного конца балки (фиг. 2б). В этом сечении приложим дополнительную силу $P_*(t)$. Тогда в этом сечении прогиб будет

$$w(t) = \int_0^l \left(\frac{\alpha_2 M(x, t)}{EJ} + \int_0^x \frac{\alpha_2 M(x, \tau) R_1(t, \tau) d\tau}{EJ} \right) \frac{\partial M(x, t)}{\partial P_*(t)} dx \bigg|_{P_*(t)=0} \quad (29)$$

Подставляя в (29)

$$M(x, t) = -\frac{q(t)x^2}{2} - P_*(t)x, \quad \frac{\partial M(x, t)}{\partial P_*(t)} = -x$$

и принимая $P_*(t) = 0$, получим

$$w(t) = \frac{q(t)l^3}{6EJ} \left[1 + \frac{1}{3} \int_0^l \frac{q(\tau)}{q(t)} R_1(t, \tau) d\tau \right]. \quad (31)$$

Представляет определенный интерес распространение приведенного вариационного метода на случай температурно-усадочных воздействий, несимметричного армирования, предварительно-напряженного железобетона и т. д.

Институт механики АН Армянской ССР

Поступило 5.1.1974

Մ. Ա. ԶԱՅՆԱՆ

ՄԱԿՐԻ ՏԵՄՊԵՐԱՏՈՐ ՎԱՐԻԱՑԻՈՆԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ԿՐԱՌՈՒՄԸ ԵՐԱԿՐԵՑՈՆԱԿԱՆ ԿՈՆՍԵՐՎԱՏԻՎԱՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՈՒՄ

Ա. Ա. ՓԻՓԻՆԻ

Հոդվածում բերվում է կաստիլյանի բանաձևի ընդհանրացումը և ծրար կիրառումը երկաթբետոնյա հեծանների 'ամար' բետոնի ժառանգական ուղղի պայմաններում: Օրինակի համար ըննարկված է մեկ անդամ ստատիկորեն անորոշ սխեման:

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести, ГИИТЛ, М.—Л., 1952.
2. Гвоздев А. А. Развитие теории железобетона в СССР, «Бетон и железобетон», № 8, 1964.
3. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести), Стройиздат, М., 1966.
4. Ушацкий И. И. Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов. Изд. «Будинивальник», 1967.
5. Прохилевич И. Е. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояние сооружений. Гостехиздат, М., 1963.
6. Вондаренко В. М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона, Изд-во Харьковского университета, Харьков, 1968.
7. Задоян М. А. О вариационных уравнениях теории ползучести, ДАН Арм. ССР, т. 26, № 5, 1958.
8. Задоян М. А. Вариационное уравнение Кастильяно нелинейно-наследственной теории ползучести, Изд. АН СССР Механика твердого тела, № 5, 1972.

Э. П. АЦИЯНИ

К ВОПРОСУ ОБ ОТРИЦАТЕЛЬНОМ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ В НАГНЕТАТЕЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

В статье определяется закон изменения давления и скорости в напорном трубопроводе при аварийном прекращении электропитания насосной станции.

С целью определения максимального повышения давления в трубопроводе, принимается случай мгновенного закрытия задвижки за насосом (см. рис. 1).

Рассматривая одномерное движение вязкой жидкости, решение задачи получим из уравнений движения и неразрывности вида:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + 2mv \right) &= 0; \\ \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь y —приведенный напор; v —скорость движения жидкости; a —скорость распространения упругих колебаний; g —ускорение силы тяжести; x —продольная ордината оси трубопровода; t —время. Гидравлический уклон представлен выражением $2mv$, где $2m = \lambda v_{\text{ср}} / 2d = \text{const}$; λ —коэффициент сопротивления трения; d —диаметр трубопровода; $v_{\text{ср}}$ —средняя скорость движения жидкости.

Данный прием линеаризации уравнения движения применен и обоснован Н. А. Чарным [1].

Из системы (1) получаются известные гиперболические уравнения относительно напора и скорости:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2m \frac{\partial y}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + 2m \frac{\partial v}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Эти уравнения решаются методом разделения переменных.

При мгновенном закрытии задвижки за насосом давление за ней быстро падает до определенной величины и остается постоянным до момента удара столба жидкости о задвижку при обратном движении.

Поэтому граничные и начальные условия для этого промежутка времени можно представить в виде:

$$\begin{aligned} y(0, t) &= -A; & y(l, t) &= 0; \\ y(x, 0) &= 0; & \left. \frac{\partial y}{\partial t} \right|_{t=0} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь A — падение напора у задвижки; l — длина трубопровода.

Решая уравнение (2) при данных начальных и граничных условиях, получаем изменение напора в трубопроводе от стационарного состояния

$$y(x, t) = A \left(\frac{x}{l} - 1 \right) + \frac{2Ag}{\pi} e^{-mt} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\cos q_n t + \frac{m}{q_n} \sin q_n t \right) \sin \frac{\pi n}{l} x, \quad (5)$$

где $q_n = \sqrt{\left(\frac{n\pi a}{l} \right)^2 - m^2}$; v_0 — скорость при стационарном движении.

Из системы (1) получаем изменение скорости движения жидкости

$$v(x, t) = \left[\frac{Ag}{2ml} (e^{-2mt} - 1) \right] - \frac{2Ag}{l} e^{-mt} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{q_n} \sin q_n t \cos \frac{\pi n}{l} x. \quad (6)$$

Имея закон изменения скорости, определяем путь, проходимый потоком жидкости

$$\begin{aligned} S(x, t) &= \left[\frac{1}{2m} \left(v_0 + \frac{Ag}{2ml} \right) (1 - e^{-2mt}) - \frac{Ag}{2ml} t \right] + \\ &+ \frac{2Ag}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(m^2 + q_n^2) q_n} \left[+ q_n + e^{-mt} (-m \sin q_n t - q_n \cos q_n t) \right] \cos \frac{\pi n}{l} x. \end{aligned} \quad (7)$$

Заметим, что в формулах (6) и (7) выражения, стоящие в квадратных скобках, соответствуют неустановившемуся движению всего столба жидкости; вторые слагаемые соответствуют упругим колебаниям внутри столба жидкости.

После закрытия задвижки столб жидкости движется замедленно, пока скорость не погасится до нуля, а затем начинается ускоренное движение в обратном направлении. Скорость при ударе столба жидкости о задвижку можно определять из зависимостей (5) и (6), учитывая, что пути замедленного и ускоренного движения равны.

Для определения скорости и напора, возникающих в трубопроводе после удара столба жидкости о задвижку, воспользуемся уравнением (3).

Начальные условия получаем из выражения (6):

$$v(x, 0) = \left[v_0 e^{-2mt} + \frac{Ag}{2ml} (e^{-2mt} - 1) \right] - \frac{2Ag}{l} e^{-mt} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{q_n} \sin q_n t \cos \frac{\pi n}{l} x, \quad (8)$$

где t_1 — промежуток времени от начала закрытия задвижки до удара об нее столба жидкости

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{t=0} = -e^{-mt} \left(2mv_0 + \frac{Ag}{l} \right) + \frac{2Ag}{l} e^{-mt} \left| m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{q_n} \sin q_n t_1 \cos \frac{n\pi}{l} x - \sum_{n=1}^{\infty} \cos q_n t_1 \cos \frac{n\pi}{l} x \right. \quad (9)$$

Из (8) следует, что скорость, с которой столб жидкости ударяется о задвижку, может быть не равной начальной скорости движения. Кроме того, при ударе о задвижку столб жидкости имеет некоторое ускорение. Эти условия характерны для отрицательного гидравлического удара и, благодаря им, максимальное движение в трубопроводе может достигнуть величины, превышающей av_0/g .

Если рассматривать движение жидкости в определенных сечениях трубопровода, то начальные условия будут:

$$v(x, 0) = u; \quad \left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{t=0} = M.$$

Граничные условия выразятся так:

$$v(0, t) = 0; \quad \left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{x=l} = 0;$$

второе условие получено из системы (1).

При данных начальных и граничных условиях выражение для скорости имеет вид [2]:

$$v(x, t) = \frac{4e^{-mt}}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \left| \frac{u}{(2k+1)} \cos q_k t + \frac{(M + mu)}{(2k+1)q_k} \sin q_k t \right| \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l} x, \quad (10)$$

$$\text{где } q_k = \sqrt{\left[\frac{(2k+1)\pi a}{2l} \right]^2 - m^2}.$$

Из системы (1) получаем выражение для напора:

$$y(x, t) = \frac{8le^{-mt}}{g\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \left| \frac{u}{(2k+1)^2} (m \cos q_k t - q_k \sin q_k t) + \frac{M + mu}{(2k+1)^2} \left(\frac{m}{q_k} \sin q_k t + \cos q_k t \right) \right| \cos \frac{(2k+1)\pi}{2l} x. \quad (11)$$

Заметим, что зависимости (10) и (11) справедливы для $t_1 < t \leq t_1 + 2l/a$, так как при $t > t_1 + 2l/a$ может не выполняться граничное условие, соответствующее $x=0$.

Для невязкой жидкости полученные зависимости имеют вид:

$$y(x, t) = A \left(\frac{x}{l} - 1 \right) = \frac{2A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos \frac{n\pi x}{l} t \sin \frac{n\pi}{l} x; \quad (5a)$$

$$v(x, t) = -\frac{Ag}{l} t - \frac{2Ag}{a\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi x}{l} t \cos \frac{n\pi}{l} x; \quad (6a)$$

$$S(x, t) = \left(v_0 t - \frac{Ag}{l} \frac{t^2}{2} \right) + \frac{2Agl}{a^2\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left(\cos \frac{n\pi x}{l} t - 1 \right) \cos \frac{n\pi}{l} x; \quad (7a)$$

$$y(x, t) = \frac{4av_0}{\pi g} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)} \sin \frac{(2k+1)\pi x}{2l} \cos \frac{(2k+1)\pi}{2l} \pi x + \\ + \frac{8lM}{g\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} \cos \frac{(2k+1)\pi}{2l} \pi x \cos \frac{(2k+1)\pi}{2l} \pi x. \quad (11a)$$

Используя данные проведенных нами экспериментов, с помощью полученных зависимостей определим изменение напора в трубопроводе при мгновенном закрытии задвижки за насосом (рис. 1). Диаметр трубопровода 0,1 м, длина $l=94$ м. Статический напор у задвижки $H_{ст}=21,2$ м.

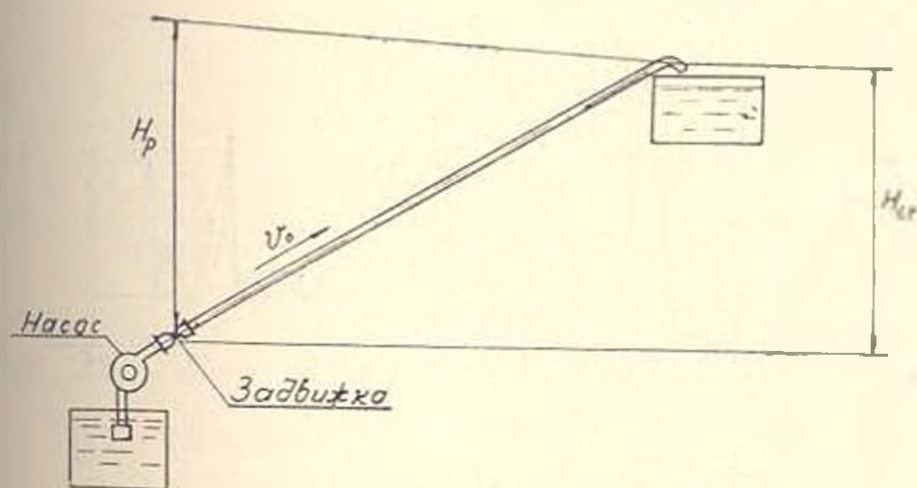


Рис. 1. Расчетная схема насосной установки

В данном примере скорость движения жидкости до закрытия задвижки $v_0=0,32$ м/сек. При $av_0/g > H_p$, где H_p — рабочий напор у задвижки, падение напора у задвижки $A=H_p+h_a$; h_a — давление ниже атмосферного. Скорость распространения упругих колебаний $a=1070$ м/сек.

Пренебрегая трением, расчет ведем по формулам для невязкой жидкости.

Промежуток времени, в течение которого у задвижки ($x=0$) существует пониженное давление, определим из (7a), приравняв его нулю

$$\left(v_0 l - \frac{Ag}{l} \frac{t^2}{2}\right) + \frac{2A'gl}{a^2 - 1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left(\cos \frac{an}{l} t - 1\right) \cos \frac{\pi n}{l} x = 0.$$

Данное уравнение имеет корни: $t_0=0$ и $t_1=2v_0 l/Ag$, если $\frac{2v_0 l}{Ag} = \frac{2l}{a}$ (где n — целое число). Из выражения t_1 видно, что если $A=av_0/g$, то $t_1=2l/a$, если же $A < av_0/g$, то $t_1 > 2l/a$. В данном случае $t_1=0,235$ сек.

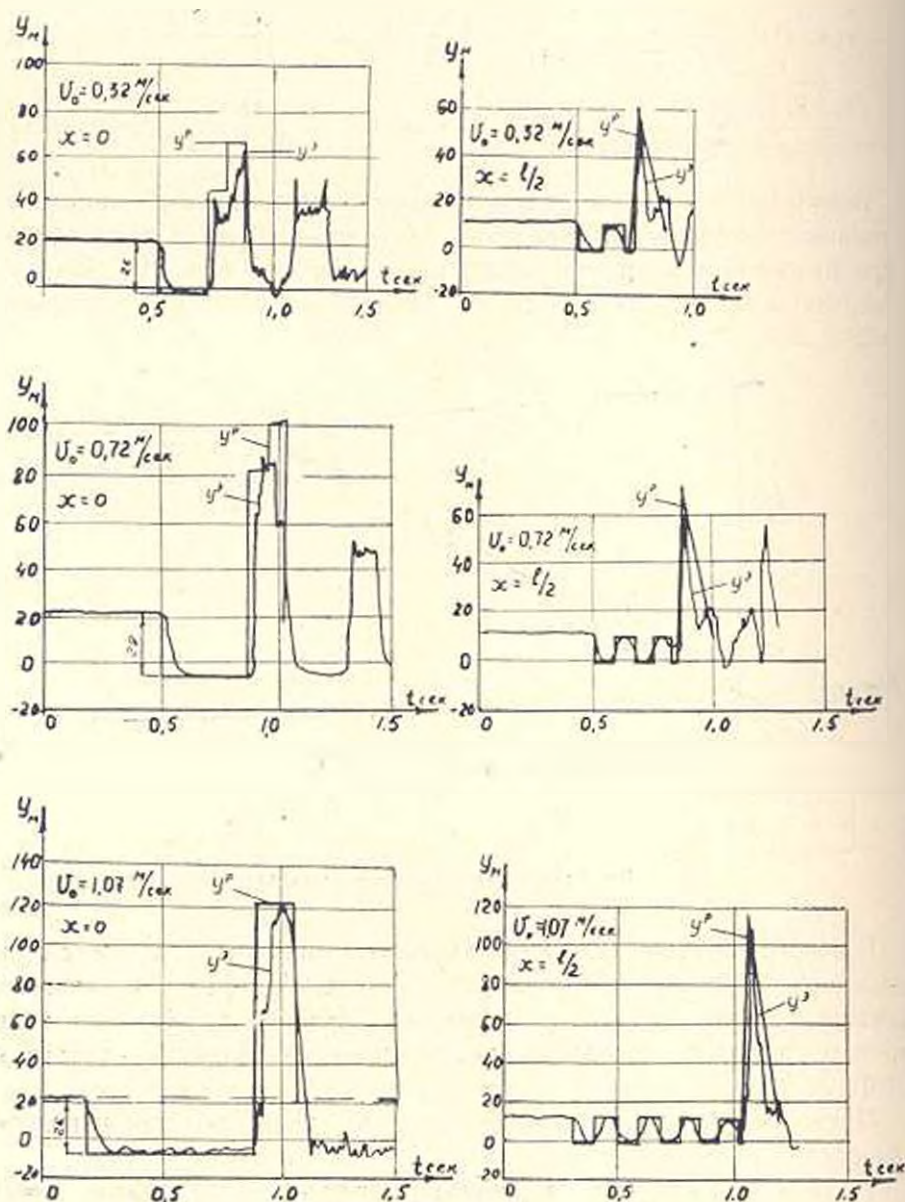


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные кривые изменения ширины и трубопровода соответственно помечены индексами p и z

Зависимость (5) показывает, что внутри столба жидкости ($x \neq 0$) имеет место колебание напора. Это колебание восстанавливает статический напор в трубопроводе. При $x=0$ восстановление статического напора будет иметь место через каждый промежуток времени, равный $2l/a$.

Если $t_1 = \pi 2l/a$, то при $t > t_1$ напор у задвижки не сразу достигнет максимального значения, а будет увеличиваться по мере подхода к данному сечению упругих колебаний.

Имея t_1 из (8а) определяем скорость, с которой столб жидкости ударяется о задвижку

$$v(0, t_1) = v_0 - \frac{Ag}{l} t_1 - \frac{2Ag}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{\pi n}{l} t_1 = 0,42 \text{ м/сек.}$$

Подставляя в (11а) $u=0,42 \text{ м/сек}$ и $M=0$, определяем повышение напора у задвижки, имея в виду, что в жидкости уже имеют место колебания напора. В середине трубопровода ($x=l/2$) изменение напора определяем из (5а), (7а) и (11а).

Кривые изменения напора, построенные по полученным формулам, показаны на рис. 2. Там же приведены экспериментальные кривые.

Некоторое расхождение расчетных и экспериментальных кривых объясняется тем, что в экспериментах задвижка за насосом закрывалась не мгновенно. Однако, полученные зависимости хорошо описывают физику явления и их можно применять при расчете трубопроводов на максимальные давления.

Армения

Поступило 20 IX.1973.

Է. Պ. ԱՇԽԱՏՅԱՆ

ՊՈՐՊԱՆԱՅԱՆԻ ՄԳՈՒԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐՈՒՄ ԲԱՅԱՍԱԿԱՆ, ՀԻՌԱՎԼԻԿԱԿԱՆ, ՀԱՐՎԱՆԻ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒՐՋՈՒ

Ա. մ. փ. փ. ո. մ.

Հաղվածում րենսարկում է ջրի շահատարած շարժման երևույթի պոմպակայանի ճնշման խողովակաշարում՝ փակակալի ակնթարթային փակման դեպքում:

Ելնելով հիդրոդինամիկ հիմնական հավասարումներից, լուսարանվում են երևույթի կինեմատիկական որոշ առանձնահատկություններ, որոնք վերաբերում են ջրի սյան հետ ու առաջ շարժվելուն և դրա հետևանքով առաջացող ճնշման փոփոխություններին: Ստացած բանաձևերը ցույց են տալիս, որ ամբողջ ջրի սյան շահատարած շարժումը ղուդադիպում է ջրի սյան առաձգական առանձնություններին, որոնք իրենց հերթին առաջացնում են արագության և ճնշման լրացուցիչ փոփոխություններ: Հաշվումներից ստացված արդյունքները բավարար ճշտությամբ համընկնում են փորձնական արդյունքներին, որը և ցույց է տալիս հաշվարկման առաջարկվող մեթոդի բնորոշչությունը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Чорный И. А. Неустояившееся движение реальной жидкости в трубах. Гостехиздат, 1951
2. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. Изд. «Наука» 1972
3. Абрамович И. Г., Левин В. И. Уравнения математической физики. Изд. «Наука» 1969.

Зарядка частиц ионами газа при учете переходного характера установившегося электрического поля Каранетян М. А. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. II)», т. XXVII, № 1, 1971, 3—10

В момент внесения заряжаемых частиц в электрическое поле, последнее перераспределяется между полухом и частицами согласно их диэлектрическим проницаемостям. В установившемся режиме постоянное электрическое поле распределяется согласно удельным электропроводностям веществ компонентов системы. Переходный характер поля, безусловно, влияет на кинетику зарядки частиц и на величину их заряда. В работе исследовано влияние переходного характера поля (иначе: проводимости веществ частиц) на кинетику и предельный заряд сферических частиц.

В работе определена также зависимость величины предельного заряда от удельной электропроводности вещества для эллипсоидальных частиц. Илл. 4, Библ. 7 назв.

УДК 517.91+621.311—50

Аналоговые устройства АМЭС-2М, предназначенные для решения дифференциальных уравнений узлов электроэнергетической системы в расчетах электромеханических переходных процессов Мурадян С. Г., Марсисян В. Ш. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. II)», т. XXVII, № 1, 1974, 11—16.

Рассмотрены алгоритмы решения дифференциальных уравнений генераторных и нагрузочных узлов энергосистем и схемы устройства его реализации, предложенные на автоматизированных моделях АМЭС-2 и АМЭС-2М. Реализованный алгоритм обеспечивает более точное решение дифференциальных уравнений и дает возможность на АМЭС-2М исследовать длительные электромеханические переходные процессы. Устройства управления процессом решения, построенные на электронных многокоординатных распределителях, позволяют более чем в два раза повысить быстродействие АМЭС-2М по сравнению с АМЭС-2.

Илл. 2, Библ. 5 назв.

УДК 621.1.016.4

Расчет мостовой схемы питания нелинейного диапазона г.э.д.с. с автоматической компенсацией г.э.д.с. свободных концов термопары Ходяиши Ю. М., Шахматян А. С. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. II)», т. XXVII, № 1, 1974, 17—21

Одним из путей повышения точности измерения температуры является подавление нелинейного диапазона. В статье приводится метод расчета мостовой схемы, которая осуществляет также автокомпенсацию г.э.д.с. свободных концов термопары.

Табл. 1, Илл. 2.

УДК 621.314.21/23+621.372.632

Общие положения для расчета трансформаторных преобразователей перемещений одного класса Мамиконян Б. М. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. II)», т. XXVII, № 1, 1974, 22—27.

Получены общие формулы, с помощью которых можно рассчитывать различные типы трансформаторных преобразователей. Рассмотрена рабо-

та преобразователей как в режиме холостого хода, так и в нагруженном режиме.

Илл. 2. Библ. 1 назв.

УДК 62-501-681.3.06

Оценки надежности комбинационных схем по отношению к одноконтурным сбоям с учетом важности элементов схемы. Сардарян Г. Г. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXVII, № 1, 1974, 28—36.

Дается метод оценки надежности комбинационных логических схем, основанный на принципе логического моделирования цифровых схем на ЭВМ, удобный для инженерного расчета. Решается задача нахождения «узких» мест в схеме.

Табл. 2. Илл. 1. Библ. 9 назв.

УДК 62—231.31

Об одном аналитическом методе синтеза приближенных прямых. Шахбазян К. Х., Джагацянцян Д. А. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXVII, № 1, 1974, 37—41.

Дан аналитический метод отыскания положения шатуновой точки, воспроизводящей приближенную прямую при наперед заданных основных размерах и четырех положениях шарнирного четырехзвенника.

Илл. 2. Библ. 3 назв.

УДК 62—255+621.643/646+517.91

К вопросу об отрицательном гидравлическом ударе в нагнетательном трубопроводе насосной станции. Анимянц Э. Н. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXVII, № 1, 1974, 48—51.

Рассматривается закон изменения давления и скорости в нагнетательном трубопроводе при аварийном прекращении электропитания насосных агрегатов. Используются основные уравнения гидродинамики, с помощью которых задача сводится к решению дифференциальных уравнений гиперболического типа с соответствующими начальными и граничными условиями. Полученные зависимости хорошо описывают физику явления. Сопоставление опытных и расчетных данных показало приемлемость рекомендуемого метода для расчета напорных трубопроводов на максимальные давления.

Илл. 2. Библ. 3 назв.

УДК 624.012.3/4.044

О применении вариационных методов теории ползучести при расчете статически неопределенных железобетонных конструкций. Задолзи М. А. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXVII, № 1, 1974, 42—47.

В статье приводится некоторое обобщение и приложение формулы Кастильяно для железобетонной балки с учетом наследственной ползучести бетона. С целью иллюстрации рассмотрена одна раз статически неопределенная система.

Илл. 2. Библ. 8 назв.

Влияние высоты порога и формы подхода воды в плане на величину коэффициента расхода шахтного водослива. Карафилян А. А. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. II)», г. XXVII, № 1, 1974, 55—59

Изложены результаты модельных исследований по установлению зависимости коэффициента расхода шахтного водослива практического профиля от высоты порога водослива и угла подхода воды к водосливу в плане.

Илл. 3. Библ. 6 назв.

ԲՈՎԱՆԳԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ԷԼԵԿՏՐԱՏԵԽՆԻԿԱ

- Ա. Ա. Կարապետյան. Մասնիկների յիցսավորումը դադի խոններով, երբ հաշվի է առնվում էլեկտրական դաշտի հաստատման անցողիկ բնույթը 3

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

- Ա. Գ. Մուրադյան, Վ. Ն. Մարտիրոսյան. էլեկտրամեխանիկական անցողիկ երևույթներում էլեկտրաէներգետիկական համակարգի հանգույցների դիֆերենցիալ հավասարմանները լուծող ԱՄՀԻ-2Մ անալոգիային սարքերը 11

Զափողական տեխնիկա

- Յու. Մ. Խոսայանց, Ա. Ս. Դադլյանյան. Զերմավույդի աշխատանքային դիսպոզիցիոնի շերտա-է.շ.ու.-ի մարման և ազատ ծայրերի ցերմա-է.շ.ու.-ի ամոտմատ կոմպենսացման կամրջակային սխեմայի հաշվարկը 17
- Ռ. Մ. Մալիկյան. Տեղափոխումների տրանսֆորմատորային ձևափոխիչների մեկ դասի հաշվարկման բնդհանուր դրույթները 22

Հաշվողական տեխնիկա

- Շ. Շ. Սարգսյան. Կոմբինացիոն սխեմաների հուսալիության գնահատումը միակի սխալների նկատմամբ՝ հաշվի առած սխեմայի էլեմենտների կարևորությունը 28

ԻՄԱՔՆԵԱՇԻՄՈՒՄ

- Կ. Խ. Շանրազյան, Վ. Ա. Ձաղաղայան. Մոտավոր ուղղագիծ-ուղղորդ մեխանիզմների սինթեզման մի անայտիկ մեթոդի մասին 37

Շինարարական մեխանիկա

- Մ. Ա. Ձաղոյան. Սուրբի տեսության վարիացիոն մեթոդների էլիբրաուսը երկաթբետոնյա կոնստրուկցիաների հաշվարկում 42

ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱ

- Է. Պ. Աշխիյանց. Պոմպակայանի մղման խողովակաշարում բացասական հիդրավլիկական հարվածի հարցի շուրջը 48

СОДЕРЖАНИЕ

Электротехника

- М. А. Карапетян. Зарядка частиц ионным газом при учете переходного характера установления электрического поля 3

Энергетика

- С. Г. Мурадян, В. Ш. Миртиросян. Аналоговые устройства АМЭС-2М, предназначенные для решения дифференциальных уравнений узла электроэнергетической системы в расчетах электромеханических переходных процессов 11

Измерительная техника

- Ю. М. Ходжазян, А. С. Шахкманян. Расчет мостовой схемы подавления нерабочего диапазона т. э. д. с. с автоматической компенсацией т. э. д. с. свободных концов терморезистора 17
- Б. М. Мамиконян. Общие положения для расчета трансформаторных преобразователей одного класса 22

Вычислительная техника

- Г. Г. Сардарян. Оценка надежности комбинационных схем по отношению к одиночным сбоям с учетом важности элементов схемы 28

Машиностроение

- К. Х. Шахбазян, А. А. Джагацян. Об одном аналитическом методе синтеза приближенных прямых 37

Строительная механика

- М. А. Задоян. О применении вариационных методов теории ползучести при расчете статически-неопределимых железобетонных конструкций 42

Гидравлика

- Э. Н. Ащиянц. К вопросу об отрицательном гидравлическом ударе в магистральном трубопроводе насосной станции 48