

Я. Я. ТОМСОНС
(Новосибирск)

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОДНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО МОСТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С КВАДРАТУРНЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ

В статье описывается способ исключения взаимосвязи контуров уравнивания в малом автоматического моста переменного тока с квадратурными детекторами (КД) и приводятся результаты исследования динамики такого моста в большом с помощью цифровой вычислительной машины (ЦВМ) при учете насыщения усилителей, сухого трения, ограничения координат.

Автоматические мосты с квадратурными детекторами (КД) обладают переменной по величине и знаку взаимосвязью контуров уравнивания [1], что ухудшает их устойчивость [2]. Анализ выражения критического коэффициента усиления [3] показывает, что статические и динамические свойства моста в малом можно улучшить уменьшением взаимосвязи контуров, причем наибольший эффект достигается в области малых углов взаимосвязи, поэтому следует искать способы ее исключения хотя бы в малом. Для окончательной оценки любого моста в малом необходимо знать характер процесса уравнивания и в большом. Это связано еще и с тем, что даже при устойчивой работе характер переходного процесса зависит от значений начальных отклонений параметров.

В работе [4] исследован процесс уравнивания автоматического моста с фиксированными векторами опорных напряжений КД в большом на аналоговой модели. Из-за сложности выражений напряжений на выходах детекторов при моделировании необходимо большое количество нелинейных блоков, а при вариации многих параметров в широком диапазоне затрудняется выбор масштабных коэффициентов. При современном состоянии развития автоматизации программирования исследование сложных нелинейных систем может оказаться более простым и полным с помощью ЦВМ.

В данной статье предлагается способ исключения взаимосвязи контуров уравнивания в малом для мостов с КД во всем диапазоне измерения и приводятся результаты анализа качества уравнивания такого моста, полученные с помощью ЦВМ.

Обычно для уменьшения взаимосвязи контуров уравнивания в качестве опорного напряжения КД применяется непосредственно напряжение элемента мостовой цепи. Развязку при этом можно получить лишь для мостов с двух- и четырехэлементными ветвями. Как показано в [5], такие мосты обладают значительно меньшей чувствительностью, чем наиболее распространенные четырехплечие мосты с трехэлементными ветвями, для которых следует искать другие способы развязки.

Для исключения взаимосвязи контуров уравнивания в малом предполагается в качестве опорного напряжения одного из КД использовать напряжение дополнительной фазовращающей цепи, состоящей из делителя напряжения $R_5=R_6$ и ветви измерительной схемы (рис. 1) или двух равных полуобмоток трансформатора и модели той же ветви измерительной цепи (рис. 2) [6]. Опорное напряжение другого КД сдви-

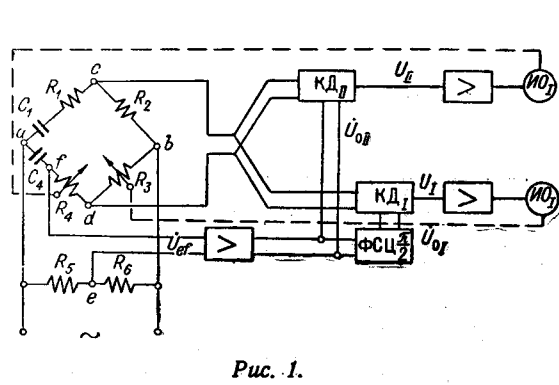


Рис. 1.

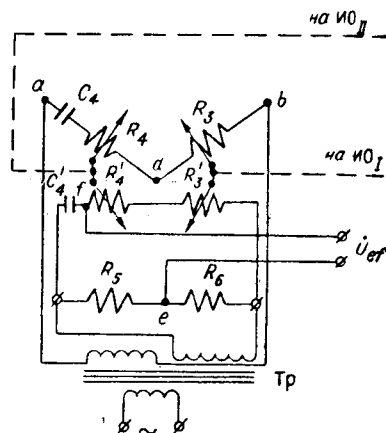


Рис. 2.

нуто относительно первого на угол $\pi/2$. При уравнивании разнородными параметрами взаимосвязь исключается в обоих направлениях, а в случае уравнивания однородными параметрами, например с помощью R_3 и R_4 (см. рис. 1), остается лишь односторонняя связь. Это видно из рассмотрения векторной диаграммы моста (рис. 3). В малом

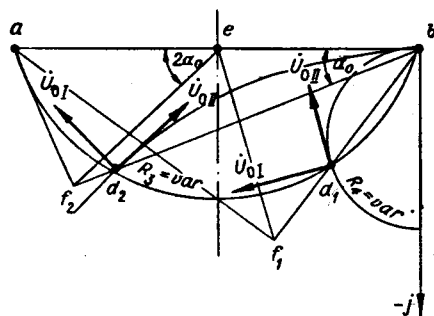


Рис. 3.

вектор опорного напряжения \dot{U}_{0II} всегда параллелен вектору напряжения \dot{U}_{e1} и совпадает с касательной к окружности уравнивания $R_4=var$. Поэтому малые изменения параметра R_4 не оказывают влияния на контур уравнивания емкости (R_3). Обратное влияние имеет место, но его следует рассматривать как возмущение по отношению к контуру уравнивания тангенса угла потерь (R_4). Несмотря на это, устойчивость каждого контура будет определяться лишь

своими параметрами. Это подтверждается и выражениями выходных напряжений КД при небольших изменениях уравнивающих параметров, которые применительно к рис. 1 имеют вид:

$$U_I = k_1 \Delta R_3 \sin \gamma_0; \quad (1)$$

$$U_{II} = k_1 \Delta R_3 \cos(-\gamma_0) - k_2 \Delta R_4, \quad (2)$$

где
$$k_1 = \frac{U_0 k_{КД} \sqrt{R_{40}^2 + X_3^2}}{(R_{30} + R_{40})^2 + X_4^2}; \quad k_2 = \frac{U_0 k_{КД} R_{30}}{(R_{30} + R_{40})^2 + X_4^2};$$

$$\gamma_0 = \arctg \frac{X_4}{R_{40}};$$

R_{30} и R_{40} — значения параметров R_3 и R_4 , соответствующие положению равновесия;

U_0 — напряжение питания мостовой цепи;

$k_{\text{КД}}$ — коэффициент передачи детектора.

Действительно, напряжение на выходе детектора (1) в основном контуре определяется лишь изменением сопротивления R_3 и не зависит от приращения уравнивающего параметра по $\text{tg } \delta_x(R_4)$. Следовательно, взаимосвязь в малом исключена.

Исследуем качество процесса уравнивания в большом. Для примера проанализируем мост (см. рис. 1) с уравниванием однородными параметрами (активными сопротивлениями). О качестве переходных процессов будем судить непосредственно по решению системы уравнений, описывающих движение автоматического моста в большом, при ступенчатых воздействиях по уравнивающим параметрам. С этой целью найдем выражения отдельных элементов контуров уравнивания.

Выражение напряжения на выходе моста (см. рис. 1) имеет вид

$$\dot{U} = U_0 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4 - jX_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2 - jX_1} \right). \quad (3)$$

Если опорное напряжение \dot{U}_{0I} сдвинуто относительно \dot{U}_{0II} на угол $+\pi/2$, то характер выходных напряжений детекторов можно представить следующим образом:

$$U_I = U_0 k_{\text{КД}} \left[\left(\frac{p_1(p_1 + p_2)}{(p_1 + p_2)^2 + 1} - \frac{c(c + d)}{(c + d)^2 + 1} \right) \frac{2(p_1 + p_2)}{(p_1 + p_2)^2 + 1} + \left(\frac{p_1}{(p_1 + p_2)^2 + 1} - \frac{c}{(c + d)^2 + 1} \right) \frac{(p_1 + p_2)^2 - 1}{(p_1 + p_2)^2 + 1} \right]; \quad (4)$$

$$U_{II} = U_0 k_{\text{КД}} \left[\left(\frac{p_1(p_1 + p_2)}{(p_1 + p_2)^2 + 1} - \frac{c(c + d)}{(c + d)^2 + 1} \right) \frac{(p_1 + p_2)^2 - 1}{(p_1 + p_2)^2 + 1} + \left(\frac{p_1}{(p_1 + p_2)^2 + 1} - \frac{c}{(c + d)^2 + 1} \right) \frac{2(p_1 + p_2)}{(p_1 + p_2)^2 + 1} \right], \quad (5)$$

где $p_1 = \frac{R_3}{X_4}$, $p_2 = \frac{R_4}{X_4}$ — обобщенные параметры [4] мостовой схемы;

$$c = \frac{R_2}{X_1}; \quad d = \frac{R_1}{X_1} = \text{tg } \delta_x.$$

Как и в [4], будем считать, что уравнение движения двигателя с учетом момента сухого трения имеет вид

$$J_j \ddot{\alpha}_j + F_j \dot{\alpha}_j = k_{\text{д}j} U_{y_j} - M_j \text{sign } \dot{\alpha}_j, \quad (6)$$

где J — приведенный момент инерции системы;
 $j=1, 2$ — индекс, указывающий на принадлежность параметра к соответствующему контуру;

α_j — угол поворота исполнительного двигателя;

F_j — коэффициент вязкого трения;

$k_{\text{д}j}$ — коэффициент усиления двигателя;

U_{y_j} — напряжение на управляющей обмотке двигателя;

M_j — приведенный момент трения.

Угол поворота двигателя α_j связан с величиной обобщенного параметра соотношением

$$\alpha_j = p_j \frac{1}{i_j v_j}, \quad (7)$$

где i_j — передаточное число редуктора;
 v_j — относительный коэффициент передачи потенциометра, равный, в свою очередь, отношению

$$v_j = \frac{r_j}{\gamma_j 2\pi X_4}. \quad (8)$$

Здесь r_j — сопротивление всего линейного потенциометра в *ом*;
 γ_j — полный угол поворота j -го потенциометра в *рад*.
 X_4 — образцовое сопротивление (емкостное) в *ом*.

В дальнейшем удобно произвести замену: $p_1 = y_1$; $p_2 = y_4$.

Учтем постоянную времени детекторов и обратные связи по скорости исполнительных двигателей.

Согласно [7], передаточную функцию детектора можно представить как

$$W_{\text{кд}} = \frac{k_{\text{кд}}}{T_p + 1} \cos \varphi. \quad (9)$$

Поскольку $k_{\text{кд}}$ и $\cos \varphi$ учтены уже в (4) и (5), то

$$T \frac{dy_3}{dt} + y_3 = U_I; \quad (10)$$

$$T \frac{dy_6}{dt} + y_6 = U_{II}. \quad (11)$$

Здесь T — постоянная времени детектора;

y_3 и y_6 — выходные напряжения КД.

Коэффициенты обратной связи могут быть выражены через параметры системы соотношением

$$k_{\text{ос}j} = \frac{m_j}{n_j i_j v_j}, \quad (12)$$

где m_j — напряжение тахогенератора при номинальной скорости тахогенератора n_j в *рад/сек*.

Напряжение на управляющих обмотках двигателей в линейной зоне усилителей при пренебрежении инерционностью последних могут быть выражены

$$U_{y1} = (y_3 k_{y1} - k_{\text{ос}1} y_1') k_{o1}; \quad (13)$$

$$U_{y2} = (y_6 k_{y2} - k_{\text{ос}2} y_4') k_{o2}. \quad (14)$$

где k_{y1} , k_{y2} — коэффициенты усиления усилительных трактов, не охваченных обратными связями;

k_{o1} , k_{o2} — коэффициенты усиления усилительных трактов, охваченных обратными связями.

При насыщении усилителей будем считать, что

$$|U_{y1}| = |U_{y2}| = |U_{\text{нас}}|.$$

Теперь можно записать всю систему уравнений в нормальной форме:

$$\begin{aligned} y_1' &= y_2; \\ y_2' &= -\frac{F_1}{J_1} y_2 + \frac{k_{\lambda 1} i_1 v_1 U_{y1}}{J_1} - \frac{i_1 v_1 M_1 \text{sign } y_2}{J_1}; \\ y_3' &= -\frac{1}{T} y_3 + \frac{U_1}{T}; \\ y_4' &= y_5; \\ y_5' &= -\frac{F_2}{J_2} y_5 + \frac{k_{\lambda 2} i_2 v_2 U_{y2}}{J_2} - \frac{i_2 v_2 M_2 \text{sign } y_5}{J_2}; \\ y_6' &= -\frac{1}{T} y_6 + \frac{U_{II}}{T}. \end{aligned} \quad (15)$$

Система (15) решалась методом Рунге-Кутты с постоянным шагом интегрирования [8] при следующих значениях измеряемых параметров и параметров мостовой цепи: $f=50$ гц, $C_x = (1 \div 10) \cdot 10^{-6}$ ф, $\text{tg } \delta_x = 0,05 \div 1$, $R_2 = 1 \cdot 10^3$ ом, $C_4 = 0,64 \cdot 10^{-6}$ ф, $R_{30} = 1565 \div 15650$ ом, $R_{40} = 250 \div 5000$ ом, $U_0 = 6,3$ в. Программа задачи составлялась на «входном языке» [9] (типа Алгол-60 [10]).

Имея в виду выпускаемые промышленностью двигатели (РД-09) и многооборотные потенциометры (20- и 10-оборотные), можно взять следующие передаточные отношения редукторов: $i_1=1$, $i_2=0,5$, что приблизительно соответствует случаю использования стандартного редуктора к РД-09 с передаточным отношением $\frac{1}{15,6}$ и однооборотных потенциометров (например, типа ПЛ) в качестве переменных сопротивлений R_3 и R_4 . При этом $v_1=0,032$, $v_2=0,016$, $k_{\lambda 1} = k_{\lambda 2} = 1,8 \times 10^{-4}$ н · м/в, $F_1 = F_2 = 1,55 \cdot 10^{-4}$ н · м/сек. Примем $J_1 = J_2 = 0,2 \times 10^{-4}$ кг · м², напряжение насыщения последнего каскада усиления 127 в, $k_{\text{КД}} = 0,7$, $k_{o1} = k_{o2} = 500$, а также следующие значения параметров y_1, y_4 , соответствующие уровню ограничения: $y_{1 \text{ min}} = 0,3$, $y_{1 \text{ max}} = 3,25$, $y_{4 \text{ min}} = 0,02$, $y_{4 \text{ max}} = 1,05$.

Значения остальных параметров (T, a, b, m), связанных с k_{y_j}, k_{ocf} и M_j (н · м) соотношениями: $M_1 = 7,2 \cdot 10^{-4}$ м, $M_2 = 5,6 \cdot 10^{-4}$ м, $k_{y1} = 3,2$ а, $k_{y2} = 6,6$ а, $k_{oc1} = 31,5$ в, $k_{oc2} = 124$ в — значения c и d , а также начальные отклонения координат системы (15) являются переменными.

При первоначальной отладке программы было выявлено, что, если величина шага интегрирования больше или равна постоянной времени самого быстродействующего инерционного звена, то по методу Рунге-Кутты решение задачи не сходится. Учитывая, что минимальная постоянная времени детектора может быть равна $0,02 \div 0,03$ сек, выбираем шаг интегрирования $h=0,01$ сек.

При определении характера переходного процесса в различных областях плоскости уравновешивания в основном менялись значения c и d

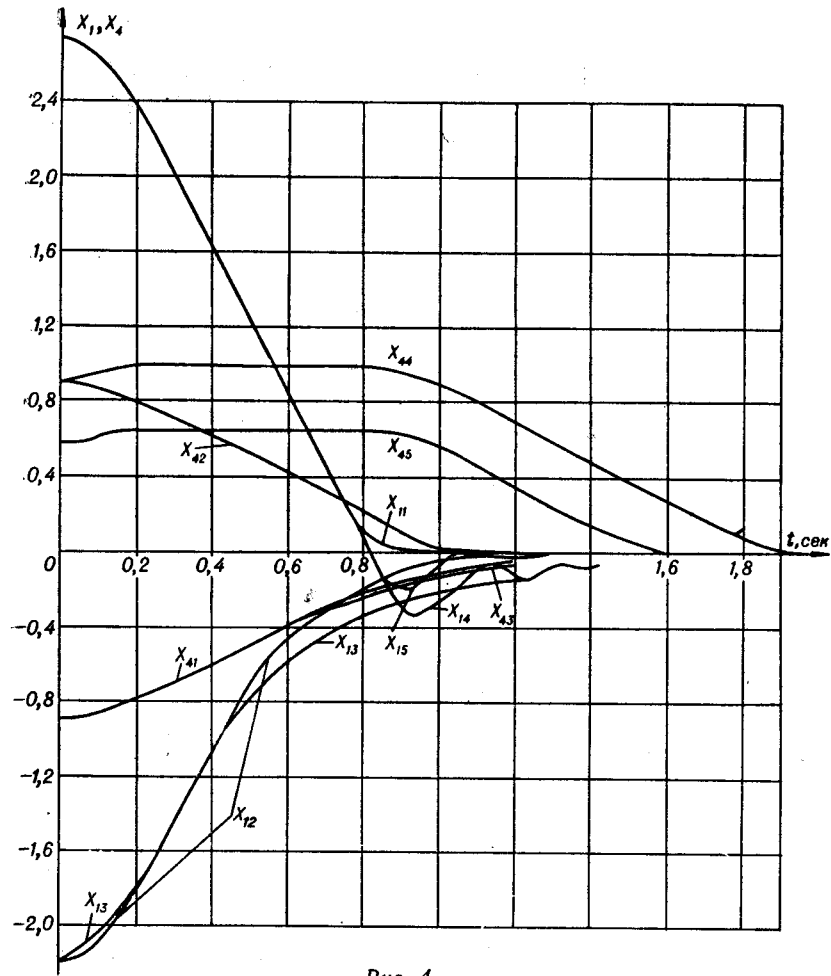


Рис. 4.

Наиболее характерные кривые переходных погрешностей уравнивания $X_1 = y_1 - c$ и $X_4 = y_4 - d$ приведены на рис. 4, а c, d, T, a, b, m — в табл. 1. Второй индекс координат X_1, X_4 указывает принадлежность их к номеру сочетания параметров.

Из анализа решения системы (15), а также из рассмотрения рис. 4 и табл. 1 следует, что при определенном выборе обратной связи можно добиться аperiodического характера переходного процесса на всей плоскости уравнивания. При определенном сочетании начальных значений параметров $X_{1н}, X_{4н}$ и значений c и d , даже при аperiodическом характере переходных процессов, может иметь место временное ложное срабатывание одного из исполнительных двигателей (X_{44} и X_{45}), за счет чего быстродействие снижается примерно в 2 раза. Для нормальной работы моста необходимо предусматривать ограничения координат (упоры). Большая тенденция к перерегулированию координат X_{15}, X_{14} объясняется тем, что с уменьшением c и d увеличивается коэффициент передачи контура за счет повышения абсолютной чувствительности мостовой цепи. Следовательно, для данной мостовой цепи и выбранных значений ее параметров предварительная проверка на устойчивость должна проводиться для точки c_{\min}, d_{\min} .

Таблица 1

№ сочетания	a	T,сек	b	m	c	d
1	10	0,02	0,08	5	0,35	0,95
2	10	0,02	0,08	5	2,5	0,06
3	10	0,02	0,08	5	2,5	0,95
4	20	0,03	0,06	5	0,35	0,06
5	20	0,03	0,06	5	0,35	0,4

Основное время уравнивания падает на участки с постоянной скоростью отработки, где влияние обратной связи, усиления и постоянной времени детектора незначительно, так как они оказывают заметное воздействие лишь при малых отклонениях и в конце переходного процесса. Поэтому при проектировании мостов, особенно быстродействующих, выбору редуктора должно быть уделено первоочередное внимание.

Если принять $i_1=i_2=0,1$, а вместо многооборотных потенциометров использовать однооборотные, то при прочих равных параметрах контуров уравнивания быстродействие системы увеличивается в два раза, а характер изменения координат X_1 и X_4 остается прежним. Максимальное время уравнивания (с учетом ложного срабатывания) составляет 1 сек, а максимально возможное время уравнивания мостов при использовании двигателей типа РД-09 со стандартным редуктором, имеющим передаточное отношение $\frac{1}{15,6}$ составляет 2 сек. Создание мостов повышенного быстродействия требует применения редукторов с большим передаточным отношением.

Таблица 2

№ сочетания	$X_{1н}$	$X_{4н}$
1	0,3	0,2
2	0,3	0,05
3	0,3	0

Для выяснения степени взаимовлияния контуров уравнивания для случая, когда $a=10, b=0,08, m=5, T=0,02, c=0,4, d=0,055$, будем менять различные сочетания начальных значений параметров $X_{1н}$ и $X_{4н}$ (табл. 2 и 3). Из анализа кривых изменения X_1 и X_4 (рис. 5, 6) следует, что контур уравнивания по $\text{tg } \delta_x (R_4)$ незначительно влияет на контур уравнивания по $C_x (R_3)$. Обратное влияние более существенно. Зону,

Таблица 3

№ сочетания	$X_{1н}$	$X_{4н}$
1	0	0,05
2	0	0,2
3	0,06	0,2

да $a=10, b=0,08, m=5, T=0,02, c=0,4, d=0,055$, будем менять различные сочетания начальных значений параметров $X_{1н}$ и $X_{4н}$ (табл. 2 и 3). Из анализа кривых изменения X_1 и X_4 (рис. 5, 6) следует, что контур уравнивания по $\text{tg } \delta_x (R_4)$ незначительно влияет на контур уравнивания по $C_x (R_3)$. Обратное влияние более существенно. Зону,

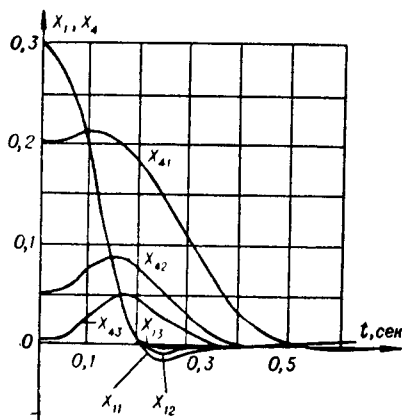


Рис. 5

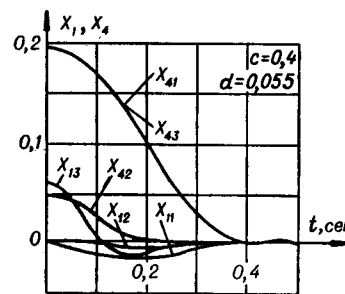


Рис. 6

в которой $\frac{|X_4|}{y_4} \leq 0,05$, можно практически считать линейной. Поскольку коэффициенты усиления усилителей обычно таковы, что насыщение наступает при $\frac{|X_4|}{y_4} \ll 0,05$, то взаимосвязь в большом не будет снижать критический коэффициент усиления. Отсюда можно сделать

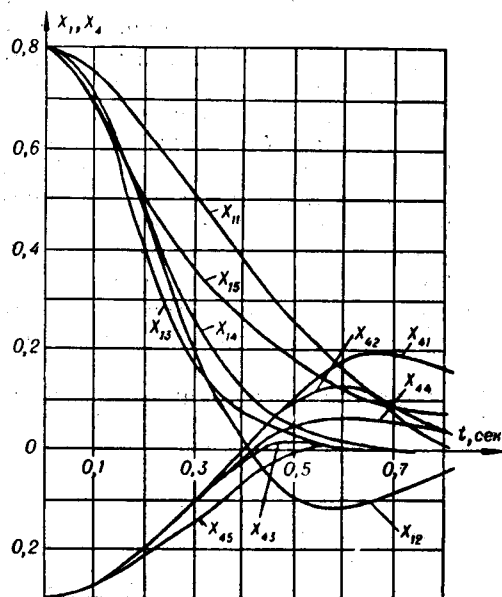


Рис. 7.

вывод, что для определения только устойчивости можно ограничиться линейной зоной моста, что облегчает анализ.

Очень важно исследовать влияние параметров T , b и m на качество процесса уравнивания. С этой целью при различных сочетаниях указанных параметров и одних и тех же начальных значениях $X_{1н}$, $X_{4н}$ и $c=1,5$; $d=0,5$ находится решение X_1 и X_4 . Ряд кривых изменения X_1 и X_4 за $0,8 \text{ сек}$ приведен на рис. 7, а значения параметров даны в табл. 4.

Сравнивая X_{13} и X_{12} , а также X_{43} и X_{42} , можно видеть, что с увеличением постоянной времени детектора процесс уравнивания происходит с перерегулированием ($T=$

$=0,14$ — постоянная времени детектора с выходом на постоянном токе при частоте 50 гц). Если увеличивать при этом обратную связь, процесс становится более плавным (X_{11} , X_{41}), время уравнивания несколько увеличивается, причем перерегулирование по координате X_4 не уменьшается (X_{41}). Это еще раз подтверждает необходимость применения на низких частотах быстродействующих детекторов или схем исключения квадратурной составляющей из сигнала разбаланса.

Увеличение сухого трения приводит лишь к увеличению времени уравнивания, не изменяя характера переходного процесса. Это обосновывает правомерность пренебрежения моментом сухого трения в мостах при расчете на устойчивость.

Выводы

Предложенный способ подслеживания векторов опорных напряжений КД позволяет исключить взаимосвязь контуров уравнивания в малом во всем диапазоне измерения, что улучшает метрологические и динамические свойства моста.

При использовании быстродействующих детекторов и соответствующем выборе величины обратной связи можно получить аperiodи-

Таблица 4

№ сочетания	b	$T, \text{сек}$	m	a
1	0,13	0,14	3	10
2	0,06	0,14	3	10
3	0,06	0,03	3	10
4	0,06	0,03	3	5
5	0,06	0,03	12	10

ческий характер переходных процессов во всех точках плоскости уравнивания.

В большом за счет ложного срабатывания одного из исполнительных двигателей уменьшается лишь быстродействие моста примерно в два раза по сравнению с быстродействием аналогичного моста, предназначенного для измерения одной составляющей комплексного сопротивления.

Если линейная зона мостовой схемы больше приведенной линейной зоны усилителей, то расчет на устойчивость каждого контура можно осуществлять независимо. Следовательно, при предложенном способе развязки контуров уравнивания облегчается и анализ моста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
2. В. Ю. Кнеллер. Об одном типе мостов переменного тока с автоматическим уравниванием двумя параметрами.— Автоматика и телемеханика, 1958, т. XIX, № 2.
3. Я. Я. Томсонс. О критическом коэффициенте усиления в автоматических мостах переменного тока.— Изв. Сиб. отд. АН СССР, серия техн. наук, 1964, № 10.
4. М. А. Гаврилюк. Моделирование автоматических мостов переменного тока с квадратурным детектированием.— ИВУЗ, Приборостроение, 1964, т. VII, № 5.
5. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
6. Я. Я. Томсонс. Автоматический мост переменного тока. Авт. свидетельство № 169674, кл. G01, 21-е, 29^а, от 7 марта 1964 г. Бюллетень изобретений, 1965, № 7.
7. Б. Х. Кривицкий. Автоматические системы радиотехнических устройств. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
8. Б. М. Каган, Т. М. Тер-Микаэлян. Решение инженерных задач на цифровых вычислительных машинах.— М.—Л., Изд-во «Энергия», 1964.
9. А. П. Ершов, Г. И. Кожухин, Ю. М. Волошин. Входной язык для систем автоматического программирования. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
10. С. С. Лавров. Универсальный язык программирования. М., Изд-во «Наука», 1964.

*Поступила в редакцию 2 февраля 1965 г.,
после переработки — 1 марта 1965 г.*