

## ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.733.025

Ф. Б. ГРИНЕВИЧ

(Новосибирск)

### КВАЗИЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯЦИОННЫЕ МОСТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Одним из актуальных вопросов при разработке автоматических мостов переменного тока, уравниваемых по двум параметрам, является создание приборов с полностью развязанными контурами регулирования (здесь и в дальнейшем имеется в виду связь в тех областях, где линии уравнивания могут быть аппроксимированы отрезками прямых).

В квадратурных мостах в общем случае связь контуров уравнивания зависит от трех факторов: угла сходимости, положения точки равновесия на круговой диаграмме и фазовых искажений в усилительно-преобразовательном тракте. В экстремальных мостах связь контуров уравнивания существенно меньше и зависит только от угла сходимости. Так как связь контуров ухудшает динамические и метрологические свойства автоматического моста, то в отношении развязки контуров экстремальные мосты имеют существенные преимущества перед квадратурными. Однако было бы весьма желательным вообще устранить связь контуров в экстремальных мостах.

В [1] предложен способ развязки контуров уравнивания экстремальных мостов. Дальнейшие исследования показали, что на основании этого способа могут быть разработаны автоматические модуляционные мосты, которые могут быть названы квазиэкстремальными. Они весьма похожи на экстремальные [2], однако отличаются от них тем, что при уравнивании в них в строгом смысле не производится поиск экстремума (минимума) при каждом цикле уравнивания по двум параметрам, хотя в конечном итоге система приводит мост к состоянию равновесия, т. е. находит минимум минимуму амплитуды выходного напряжения моста.

Рассмотрим возможность полной развязки контуров уравнивания в модуляционных мостах и принцип построения квазиэкстремальных мостов.

Пусть уравнивание автоматического моста производится путем регулирования параметров  $p$  и  $q$ . Если контуры уравнивания в автоматическом мосте не связаны, то при нарушении равновесия, например по параметру  $p$ , возникает лишь регулирующее воздействие  $U_p$ , вызывающее регулировку только параметра  $p$ ; при нарушении равновесия по  $q$  возникает только регулирующее воздействие  $U_q$ . Если контуры уравнивания связаны, то при нарушении равновесия моста по параметру  $p$  возникает не только сигнал  $U_p$ , но и некоторый

паразитный сигнал  $U_q'$ . При этом, кроме необходимой регулировки параметра  $p$  будет также производиться паразитная регулировка параметра  $q$ , что является нежелательным. Аналогичное положение возможно также при нарушении равновесия моста по параметру  $q$  [2].

На рис. 1 представлена векторная диаграмма напряжений мостовой цепи, находящейся вблизи состояния равновесия (дуги окружностей линий уравнивания по параметрам  $p$  и  $q$  заменены отрезками прямых). Угол сходимости  $\gamma$  моста

равен  $\gamma = \frac{\pi}{2}$ . Вершины указательной диагонали моста обозначены буквами  $c$  и  $d$ .

Если мост находится в равновесии, то точки  $c$  и  $d$  на векторной диаграмме совпадают. Пусть мост выведен из состояния равновесия по параметру  $p$ . Точка  $d$  при этом займет положение  $dp$ . При модуляции параметра  $p$  конец вектора выходного напряжения мостовой цепи  $U_{cd}$  будет периодически перемещаться по отрезку  $dp_1dp_2$ . Модуль вектора  $U_{cd}$  будет изменяться с частотой модуляции, что может быть использовано для формирования регулирующего воздействия  $U_p$ . При модуляции

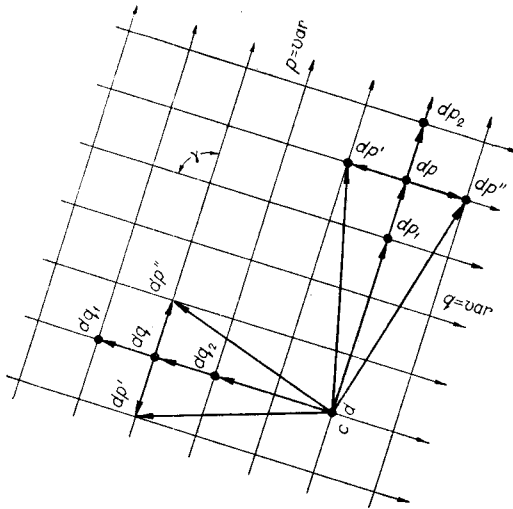


Рис. 1.

параметра  $q$  конец вектора  $U_{cd}$  будет перемещаться по отрезку  $dp'dp''$ . Модуль вектора  $U_{cd}$  при этом будет изменяться в первом приближении с удвоенной частотой модуляции. Паразитный сигнал  $U_q'$  будет отсутствовать. Если мост выведен из состояния равновесия по параметру  $q$ , то точка  $d$  переместится в положение  $dq$ . Как видно из рис. 1, при этом будет сформирован только сигнал  $U_q$ , а сигнал  $U_p$  будет отсутствовать.

Таким образом, при  $\gamma = \frac{\pi}{2}$  контуры уравнивания экстремального моста будут всегда развязаны, независимо от расположения точки равновесия на круговой диаграмме и фазовых искажений в усилительно-преобразовательном тракте.

На рис. 2 представлена векторная диаграмма напряжений экстремального моста при неидеальной сходимости ( $\gamma \neq \frac{\pi}{2}$ ). Если в этом случае мост также будет выведен из состояния равновесия по параметру  $p$  (точка  $d$  займет положение  $dp$ ), то, как видно из рис. 2, при модуляции параметра  $p$  возникает сигнал  $U_p$ , а при модуляции параметра  $q$  возникает некоторый паразитный сигнал  $U_q$ , поскольку при движении конца вектора  $U_{cd}$  по отрезку  $dq'dq''$  периодические изменения модуля этого вектора будут содержать первую гармонику частоты модуляции. Аналогичное положение будет иметь место также при нарушении равновесия по параметру  $q$ . При этом модуляция параметра  $p$  вызывает появление паразитного сигнала  $U_p$ . Как показано в [2], коэффициент  $\beta_{pq}$  взаимной связи контуров уравнивания  $p$  и  $q$  в экстремальном мосте, определяемый как отношение паразитного сигнала к полезному, равен

$$\beta_{pq} = \frac{U_q'}{U_p} = \frac{U_p'}{U_q} = \cos \gamma. \quad (1)$$

При построении известных экстремальных систем всех типов (в том числе и модуляционных экстремальных систем) пробное воздействие (модуляция) осуществляется по регулируемому параметру. Этот принцип был положен и в основу построения экстремальных мостов переменного тока, предложенных в [3]. Однако дальнейшие исследования показали, что нет необходимости в мостах строго придерживаться указанного принципа: возможно построение квазиэкстремальных модуляционных мостов, в которых формирование управляющего воздействия осуществляется посредством модуляции не регулируемого, а другого параметра, иногда специально вводимого в цепь. При этом динамические и метрологические характеристики автоматического моста могут быть улучшены за счет полной развязки контуров уравновешивания.

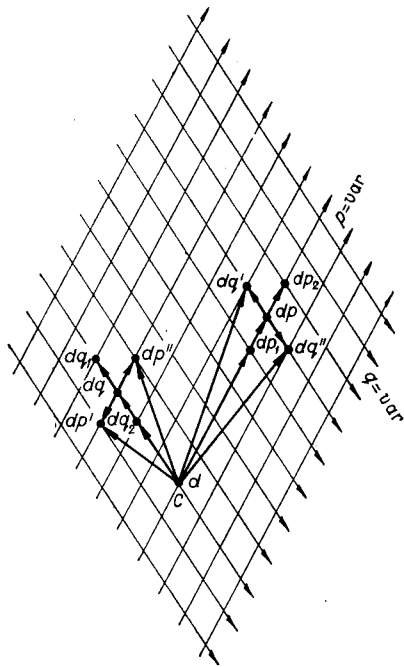


Рис. 2.

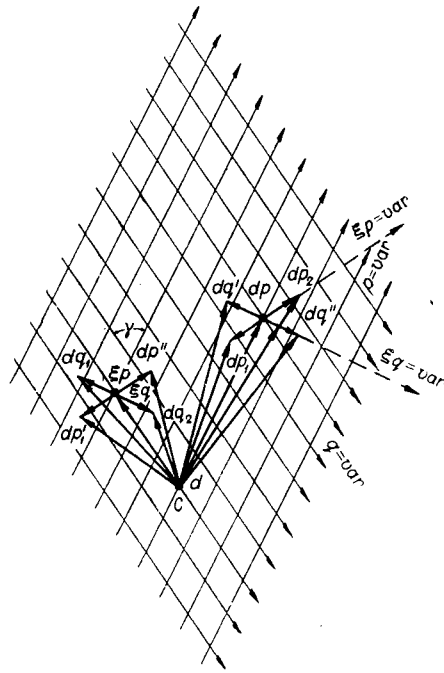


Рис. 3.

На рис. 3 показана векторная диаграмма напряжений квазиэкстремального моста. Для формирования регулирующих воздействий  $U_p$  и  $U_q$  модуляция осуществляется не по  $p$  и  $q$ , как обычно, а по другим параметрам:  $\xi p$  и  $\xi q$ . При этом линия регулирования параметра  $\xi p$ , модулируемого для получения управляющего воздействия  $U_p$ , должна быть перпендикулярна линии уравновешивания по параметру  $q$  ( $q = \text{var}$ ), а линия регулирования параметра  $\xi q$ , модулируемого с целью получения воздействия  $U_q$ , должна быть перпендикулярна линии уравновешивания по параметру  $p$  ( $p = \text{var}$ ). На рис. 3 изображены вариации вектора выходного напряжения  $\dot{U}_{cd}$ , соответствующие необходимым

модуляционным воздействиям  $\Delta\xi p$  и  $\Delta\xi q$ . Как видно из рис. 3, при нарушении равновесия по параметру  $p$  (точка  $d$  занимает положение  $dp$ ) модуляционное воздействие  $\Delta\xi p$  приводит к тому, что конец вектора  $\dot{U}_{cd}$  скользит по отрезку  $dp_1 dp_2$ , при этом модуль  $|\dot{U}_{cd}|$  изменяется с частотой модуляции, что используется для формирования управляющего воздействия  $U_p$ . При модуляционном воздействии  $\Delta\xi q$  конец вектора  $\dot{U}_{cd}$  скользит по отрезку  $dq' dq''$ , модуль вектора  $|\dot{U}_{cd}|$  изменяется с частотами, удвоенными по отношению к частоте модуляции, и паразитное регулирующее воздействие  $U_q$  будет равно нулю (доказательство того, что при перпендикулярности линии модуляционного воздействия и направления вектора  $\dot{U}_{cd}$  регулирующее воздействие будет равно нулю, дано в [2]). При нарушении равновесия моста по  $q$  точка  $d$  займет положение  $dq$ . Модуляционное воздействие  $\Delta\xi q$  будет вызывать перемещение конца вектора  $\dot{U}_{cd}$  по отрезку  $dq_1 dq_2$ , модуль вектора  $\dot{U}_{cd}$  будет изменяться с частотой модуляции, что приведет к формированию полезного сигнала  $U_q$ . Паразитный сигнал  $U_p$  будет отсутствовать, так как модуляционное воздействие  $\Delta\xi p$  вызовет изменение модуля  $|\dot{U}_{cd}|$  с удвоенными по отношению к модуляционной частотами. Следовательно, при нарушении равновесия по  $p$  появится только управляющее воздействие  $U_p$ , а при нарушении равновесия по  $q$  — только управляющее воздействие  $U_q$ . Паразитные сигналы  $U_p$ ,  $U_q$  будут отсутствовать, и контуры уравнивания будут взаимно развязаны. Так как, кроме того, вышеприведенные выкладки в принципе справедливы для любых величин угла сходимости  $\gamma$ , то можно говорить о том, что в квазиэкстремальных мостах осуществляется полная развязка контуров уравнивания вне зависимости от величины угла сходимости  $\gamma$ .

При построении квазиэкстремальных модуляционных мостов весьма важное значение имеет определение характера и места включения вспомогательных модулируемых параметров  $\xi p$  и  $\xi q$ . Согласно [4], угол сходимости  $\gamma$  равен

$$\gamma = \arg \frac{\partial H}{\partial p} - \arg \frac{\partial H}{\partial q}, \quad (2)$$

где  $H = Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4 = 0$  — условие равновесия мостовой цепи. Используя (2), соотношения между линиями уравнивания  $p = \text{var}$ ,  $q = \text{var}$ ,  $\xi p = \text{var}$  и  $\xi q = \text{var}$  можно математически выразить следующим образом:

$$\begin{cases} \arg \frac{\partial H}{\partial p} - \arg \frac{\partial H}{\partial \xi q} = \pm \frac{\pi}{2}; \\ \arg \frac{\partial H}{\partial q} - \arg \frac{\partial H}{\partial \xi p} = \pm \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Многочлен  $H$  в большинстве случаев может быть представлен

$$H = Ap + Bq + F, \quad (4)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $F$  — комплексные коэффициенты, зависящие от параметров плеч моста. При наличии модуляционных воздействий по вспомогательным параметрам  $\xi p$  и  $\xi q$  многочлен  $H$  будет иметь вид

$$H = Ap + Bq + F + f_1(\xi p) + f_2(\xi q), \quad (5)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  — функции, определяющие характер и величину модуляционных воздействий по параметрам  $\xi p$  и  $\xi q$ . Опуская знак в правой части равенств (3), из (5) и (3) получим:

$$\begin{aligned} \arg \frac{\partial H}{\partial \xi q} &= \arg \frac{\partial f_2}{\partial \xi q} = \arg A j; \\ \arg \frac{\partial H}{\partial \xi p} &= \arg \frac{\partial f_1}{\partial \xi p} = \arg B j. \end{aligned}$$

Так как при равенстве аргументов комплексные числа могут отличаться только действительным множителем, то из последних равенств имеем:

$$\frac{\partial f_2}{\partial \xi q} = K_2 A j; \quad \frac{\partial f_1}{\partial \xi p} = K_1 B j, \quad (6)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  — действительные числа. Из (6) найдем:

$$f_2 = K_2 A j \xi q + F q; \quad f_1 = K_1 B j \xi p + F p,$$

где  $F p$  и  $F q$  — постоянные интегрирования. Поскольку при  $\xi p = 0$  и  $\xi q = 0$  модуляционные функции  $f_1$  и  $f_2$  также равны нулю, то  $F p = F q = 0$ . Следовательно,

$$f_2 = K_2 A j \xi q; \quad f_1 = K_1 B j \xi p. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), окончательно получим

$$H = A(p + jK_2 \xi q) + B(q + jK_1 \xi p) + F. \quad (8)$$

Уравнение (8) может быть использовано для синтеза схемы квазиэкстремального модуляционного моста при заданной схеме измерительной цепи обычного моста. Покажем это на примере моста Вина (рис. 4). Многочлен  $H$  для моста Вина без учета модуляционных воздействий равен

$$H = (R_1 + jX_1)R_3 - (R_4 + jX_4)R_2 = (R_1 + jX_1)R_3 - R_2R_4 - jR_2X_4, \quad (9)$$

где  $R_3 = p$ ,  $R_4 = q$  — регулируемые параметры.

Из сопоставления (4) и (9) видно, что

$$A = R_1 + jX_1; \quad B = -R_2; \quad F = -jR_2X_4.$$

Уравнение (8) с учетом последних равенств можно записать так:

$$\begin{aligned} H &= (R_1 + jX_1)(R_3 + jK_2 \xi q) - \\ &- R_2(R_4 + jK_1 \xi p) - jR_2X_4. \end{aligned} \quad (10)$$

Из (10) следует, что для осуществления квазиэкстремального модуляционного моста при уравновешивании по  $R_3$  (измерение реактивного сопротивления) необходимо формировать управляющее воздействие

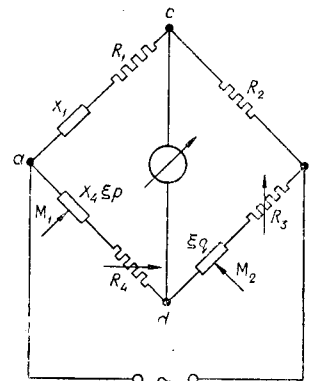


Рис. 4.

при помощи модуляции реактивного сопротивления величиной  $K_1 \xi p$ , включенного последовательно с активным сопротивлением  $R_4$  (как видно из схемы, это можно осуществить изменением сопротивления  $X_4$ ), а при уравнивании по  $R_4$  (измерение тангенса угла потерь управляющее воздействие необходимо формировать при помощи модуляции реактивного сопротивления  $K_2 \xi q$ , включенного последовательно с сопротивлением  $R_3$ ). Величины  $K_1 \xi p$  и  $K_2 \xi q$  выбираются на основании допустимой глубины модуляции и требуемой чувствительности измерительной цепи. На рис. 4 представлена схема измерительной цепи квазиэкстремального моста с введенными вспомогательными модуляционными параметрами  $\xi p$  и  $\xi q$ , управляемыми от модуляторов  $M_1$  и  $M_2$  соответственно.

Мы получили схему квазиэкстремального моста с ползой развязкой контуров уравнивания\*, где модулируемые сопротивления включаются последовательно с плечевыми сопротивлениями. Приняв в условиях (3) другие знаки в правой части равенств, можно получить выражение для схемы с параллельным включением модулируемых сопротивлений.

Очевидно, что квазиэкстремальные мосты могут быть осуществлены практически по всем измерительным цепям обычных уравновешенных мостов, в том числе и по измерительным цепям мостов с тесной индуктивной связью.

Можно предположить, что полная развязка контуров уравнивания квазиэкстремальных мостов связана с ухудшением каких-либо других параметров прибора. Действительно, как это можно видеть из сравнения рис. 2 и 3, при развязке контуров произойдет некоторая потеря в чувствительности моста. Для определения величины этой потери рассмотрим работу моста при нарушении равновесия, например, по параметру  $p$ . Из рис. 2 видно, что модуляционное воздействие  $\pm \Delta p$  вызовет приращение вектора  $U_{cd}$ , соответствующее отрезку  $dp_1 dp_2$ . Модуль вектора  $U_{cd}$  изменится также на величину  $dp_1 dp_2$ . При развязке контуров (см. рис. 3) модуляционное воздействие  $\pm \Delta \xi p$  также будет приводить к приращению вектора  $U_{cd}$  на  $dp_1 dp_2$ , однако модуль вектора  $U_{cd}$  в этом случае будет изменяться только на величину, которую приближенно можно определить по формуле

$$(dp_1 dp_2) \cos \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right) = (dp_1 dp_2) \sin \gamma.$$

Следовательно, если управляющее воздействие экстремального моста равно  $U_p$ , то для квазиэкстремального оно будет равным  $U_p \sin \gamma$ . Сопоставляя последнее выражение с равенством (1), видим, что связь контуров прямо пропорциональна косинусу угла сходимости, а потеря чувствительности при развязке контуров примерно пропорциональна синусу угла сходимости. Как показано в [5], угол сходимости  $\gamma$  при раздельном отсчете равен фазовому углу контролируемого сопротивления. Так как тангенс угла потерь очень редко бывает больше единицы, то в наихудшем случае угол сходимости не будет меньше  $\frac{\pi}{4}$ . Следовательно, максимальная потеря чувствительности будет составлять

$$U_p - U_p \sin \gamma = U_p \left( 1 - \sin \frac{\pi}{4} \right) \approx 0,3 U_p,$$

\* В принципе возможна как взаимная, так и односторонняя развязка контуров регулирования. В последнем случае мосты можно назвать полуквазиэкстремальными.

т. е. около 30%. Очевидно, что такое уменьшение чувствительности не является существенным и легко может быть скомпенсировано увеличением напряжения питания моста или улучшением избирательности выходного усилителя и увеличением его коэффициента усиления\*.

На основании изложенного можно заключить, что квазиэкстремальные автоматические модуляционные мосты практически легко осуществимы. В связи с тем, что они обладают в любых случаях идеальной сходимостью и хорошей чувствительностью, они найдут широкое применение в измерительной технике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Б. Гриневич. Способ уравнивания модуляционных экстремальных мостов переменного тока. Авторское свидетельство № 201532.— Бюллетень изобретений, 1967, № 18.
2. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
3. Ф. Б. Гриневич. Способ автоматической балансировки электрического моста переменного тока. Авторское свидетельство № 142359.— Бюллетень изобретений, 1961, № 21.
4. К. Б. Карандеев. Методы электрических измерений. М., Госэнергоиздат, 1952.
5. К. Б. Карандеев, Р. С. Кравцов. О связи между углом сходимости моста переменного тока и условиями раздельного отсчета.— Доклады Львовского политех. ин-та, 1958, т. II, вып. 2.

*Поступила в редакцию  
27 июня 1967 г.*

---

\* Полное исследование чувствительности подобных мостов может явиться предметом самостоятельных работ.