

*ручной*  
*автомат*

М. А. АХМАМЕТЬЕВ, Ф. Б. ГРИНЕВИЧ  
(Новосибирск)

### НОВЫЙ СПОСОБ ПООЧЕРЕДНОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ МОСТОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА\*

Рассматриваются вопросы построения экстремальных мостов переменного тока без модуляторов. Описывается метод ступенчатого уравнивания мостов по двум параметрам. Производится сравнение этого метода с методом Гаусса — Зайделя. Приводится блок-схема экстремального моста со ступенчатым уравниванием. Показывается, что метод ступенчатого уравнивания наиболее целесообразно применять при измерении равновеликих параметров комплексных сопротивлений с большими потерями, когда угол сходимости существенно отличается от 90.

Ручное поочередное уравнивание мостов переменного тока с амплитудными нулевыми указателями фактически основано на поиске экстремума (минимума) амплитуды выходного напряжения моста. Широкое распространение такие мосты получили из-за своей простоты, высокой точности измерения на одной частоте и возможности использования их при измерениях в широком непрерывном диапазоне частот. Можно надеяться, что такими же достоинствами будут обладать и автоматические экстремальные мосты с поочередным уравниванием, вопросам построения которых уделяется все большее внимание [1—4].

Характеристики мостов в значительной мере определяются методом поиска экстремума, поэтому создание новых более эффективных методов поиска экстремума является одной из актуальных задач при разработке автоматических мостов с поочередным уравниванием.

В статье описывается новый метод поиска экстремума, производится сравнение его с методом Гаусса — Зайделя, который положен в основу известных мостов, и приводится блок-схема автоматического моста, реализующего новый метод (следует отметить, что этот метод применим только к таким малоинерционным объектам, как мостовые измерительные цепи).

Существо предлагаемого метода можно уяснить из рассмотрения рис. 1, на котором представлен участок топографической диаграммы мостовой измерительной цепи, находящейся вблизи состояния равновесия. Целью уравнивания является совмещение потенциальной точки  $c$  с точкой  $d$ . Для упрощения предположим, что в процессе уравни-

\* Материал доложен на VII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1965 г. в Новосибирске.

шивания перемещается только точка  $c$ . При этом процесс уравнивания можно характеризовать траекторией этой точки. Так как время уравнивания в общем случае увеличивается с увеличением длины траектории точки  $c$ , то при разработке новых способов уравнивания необходимо стремиться к уменьшению этой длины.

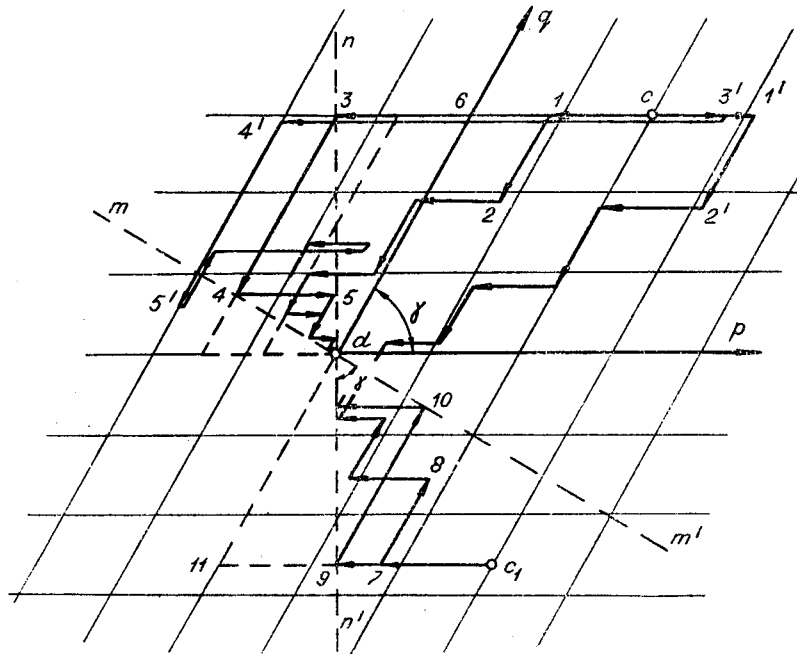


Рис. 1.

Уравнивание производится следующим образом. Точка  $c$  посредством поочередной регулировки параметров  $p$  и  $q$  перемещается по ломаной линии  $c-1-2 \dots d$ . Время шага выбирается постоянным. Скорость изменения параметров, а следовательно, и величина шага делаются пропорциональными модулю напряжения неравновесия мостовой измерительной цепи  $U_{cd}$ . Оценка правильности направления изменения параметра осуществляется после каждого шага. Для этого запоминаются два значения модуля напряжения неравновесия (в начале и в конце шага), которые сравниваются между собой. Результат сравнения используется для определения направления следующего шага по данному параметру.

Сравним траекторию точки  $c$ , получаемую при уравнивании по предлагаемому методу, с траекторией при уравнивании по методу Гаусса — Зайделя, который пока является единственным методом поиска экстремума, используемым в мостах с поочередным уравниванием [1, 2, 4]. Процесс уравнивания по методу Гаусса — Зайделя на топографической диаграмме представляется линией  $c-3-4-5 \dots d$ .

Отличительной особенностью метода является то, что регулировка каждого из параметров продолжается до тех пор, пока модуль напряжения неравновесия мостовой цепи не достигнет минимума. Это приводит к увеличению длины траектории  $c-3-4-5 \dots d$  по сравнению с длиной минимальной траектории  $c-6-d$ , что в итоге может привести к увеличению времени уравнивания моста.

Метод ступенчатого уравнивания позволяет уменьшить траекторию точки  $c$ , приблизив ее длину к длине минимальной траектории. Из сравнения траектории  $c-1-2 \dots d$  с траекторией  $c-3-4-5 \dots d$  видно, что при ступенчатом уравнивании длина траектории меньше, чем при уравнивании по методу Гаусса — Зайделя. Степень уменьшения траектории зависит от угла сходимости  $\gamma$ . Чем меньше угол сходимости, тем больше выигрыш в длине траектории. Кроме того, степень уменьшения траектории зависит от исходного положения точки  $c$  на топографической диаграмме и от того, по какому из параметров делается первый шаг уравнивания. Если точка  $c$  лежит в областях  $mdn$  и  $m'dn'$ , то выигрыша в пути не получается и не может получиться, поскольку для обоих методов длина траектории минимальна (траектории  $c_1-7-8 \dots d$  и  $c_1-9-10 \dots d$  примерно равны минимальной траектории  $c_1-11-d$ ). Выигрыш в длине траектории возможен только при расположении точки  $c$  в областях  $mdn'$  и  $ndm'$ , величина площадей которых зависит от угла сходимости. Следовательно, уменьшение угла сходимости приводит не только к увеличению выигрыша в длине траектории, но еще и к увеличению областей, в которых метод ступенчатого уравнивания дает этот выигрыш.

Как уже упоминалось выше, при ступенчатом уравнивании время шага остается неизменным. Следовательно, время, в течение которого исполнительный регулирующий элемент включен, равно времени, в течение которого он выключен. Так как в качестве исполнительных элементов часто используются реверсивные двигатели, величина управляющего напряжения которых ограничивается мощностью, рассеиваемой в обмотках двигателя, то постоянство шага (при условии, что его время существенно меньше постоянной времени нагрева двигателя) позволяет в 1,4 раза увеличить напряжение на обмотке управления двигателя и тем самым повысить скорость уравнивания.

Рассмотрим блок-схему автоматического моста (рис. 2) со ступенчатым уравниванием.

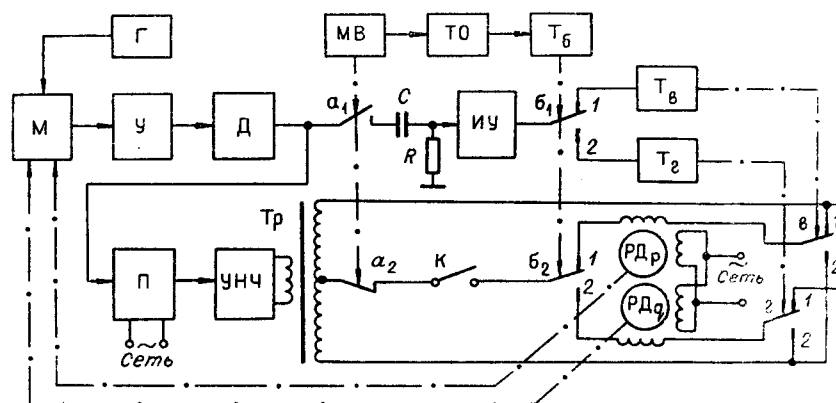


Рис. 2.

Напряжение рабочей частоты с генератора  $\Gamma$  подается на мостовую измерительную цепь  $M$ . Напряжение неравновесия мостовой цепи усиливается усилителем  $У$ , коэффициент которого выбирается таким образом, чтобы в диапазоне измеряемых величин напряжение неравновесия не ограничивалось. Усиленное напряжение выпрямляется амплитудным детектором  $Д$  и преобразуется в низкочастотное переменное с помощью

преобразователя П. Последнее усиливается усилителем низкой частоты УНЧ и через трансформатор Тр и контакты  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $v$ ,  $z$  воздействует на управляющую обмотку одного из реверсивных исполнительных двигателей РД<sub>р</sub> или РД<sub>q</sub>. Кроме того, выпрямленное напряжение с выхода амплитудного детектора Д поступает также на устройство управления. В состав его входят мультивибратор МВ, триггер с одним устойчивым состоянием ТО, триггеры со счетным входом Т<sub>б</sub>, Т<sub>в</sub>, Т<sub>г</sub>, импульсный усилитель ИУ, дифференцирующая RC-цепь и контакты  $a_1$  и  $b_1$ . Мультивибратор МВ управляет контактами  $a_1$  и  $a_2$ , задавая постоянный такт работы системы уравнивания. Режим работы мультивибратора выбирается таким, чтобы время, в течение которого контакт  $a_1$  разомкнут, было много больше времени, в течение которого он замкнут. Мультивибратор управляет также контактами  $b_1$  и  $b_2$ , частота переключения которых, благодаря применению триггеров ТО и Т<sub>б</sub>, вдвое меньше частоты переключения контактов  $a_1$  и  $a_2$ . Время, в течение которого контакты  $b_1$ ,  $b_2$  находятся в положении 1, равно времени нахождения их в положении 2. Переключение контактов  $b_1$ ,  $b_2$  из положения 1 в положение 2 означает переход системы от регулировки параметра  $p$  к регулировке параметра  $q$ . Переключением контактов  $v$  и  $z$  производится реверс исполнительных двигателей РД<sub>р</sub> и РД<sub>q</sub>.

Мост работает следующим образом. В момент подключения исследуемого комплексного сопротивления к мостовой измерительной цепи кнопка К разомкнута. Если после подключения сопротивления мостовая измерительная цепь оказывается неуравновешенной, то на выходе амплитудного детектора Д появляется некоторое постоянное выпрямленное напряжение  $U$ , пропорциональное модулю напряжения неравновесия мостовой цепи. Следовательно, на выходе трансформатора Тр имеется напряжение переменного тока. Однако управляющие обмотки реверсивных двигателей обесточены, и их роторы неподвижны. Мультивибратор периодически переключает контакты  $a_1$ ,  $a_2$  и  $b_1$ ,  $b_2$ . Так как постоянная времени RC-цепи выбирается много меньше времени, в течение которого контакт  $a_1$  замкнут, то конденсатор С оказывается заряженным до напряжения  $U$ .

Процесс уравнивания моста начинается после нажатия пусковой кнопки К. Если к моменту замыкания кнопки К контакты находятся в состояниях, показанных на рис. 2, то напряжение с выхода трансформатора Тр подается на управляющую обмотку двигателя РД<sub>р</sub>. Ротор двигателя приходит во вращение и изменяет параметр  $p$  до тех пор, пока контакт  $a_2$ , управляемый мультивибратором МВ, не разомкнется и управляющая обмотка двигателя РД<sub>р</sub> не обесточится.

Так как напряжение  $U$  на выходе амплитудного детектора во время регулировки параметра  $p$  изменится на некоторую величину  $\Delta U$ , то при замыкании контакта  $a_1$  на вход импульсного усилителя и на вход триггера Т<sub>в</sub> поступит импульс напряжения, знак которого будет зависеть от увеличения или уменьшения напряжения  $U$  во время шага.

Если напряжение увеличится (мост вышел из состояния равновесия), то на вход триггера Т<sub>в</sub> поступит положительный импульс. Триггер Т<sub>в</sub> перейдет в другое устойчивое состояние и перебросит контакт  $v$  из положения 1 в положение 2, которое соответствует подаче на управляющую обмотку двигателя напряжения противоположной фазы, т. е. следующий шаг по параметру  $p$  будет сделан в противоположном направлении. После окончания регулировки параметра  $p$  и переключения контакта  $v$  контакты  $b_1$  и  $b_2$  переходят из положения 1 в положение 2 и подготавливают цепь управления двигателем РД<sub>q</sub>.

При повторном замыкании контакта  $a_2$  напряжение с трансформатора Тр подается на управляющую обмотку двигателя РД<sub>q</sub>. Начинается регулировка параметра  $q$ , которая продолжается до размыкания контакта  $a_2$ . Если за время регулировки напряжение на выходе детектора уменьшится (мост приближался к состоянию равновесия), при замыкании контакта  $a_1$  на вход импульсного усилителя поступит отрицательный импульс. Триггер Т<sub>r</sub> и контакт  $z$  останутся в прежних положениях, т. е. следующий шаг по параметру  $q$  будет сделан в том же направлении. Через некоторый промежуток времени, определяемый задержкой триггера ТО и необходимым для того, чтобы импульс с выхода усилителя ИУ успел пройти на вход триггера Т<sub>r</sub>, контакты  $b_1$  и  $b_2$  снова приходят в положение,  $I$  и подготавливают цепь управления двигателем РД<sub>p</sub>.

При следующем замыкании контакта  $a_2$  снова начинается регулировка параметра  $p$ , но теперь уже в направлении, соответствующем приближению моста к состоянию равновесия. Уравновешивание продолжается до тех пор, пока напряжение на выходе мостовой цепи не станет равным нулю. При изменении параметров исследуемого комплексного сопротивления и нарушении равновесия система автоматически переходит на поиск нового положения минимума напряжения неравновесия мостовой цепи.

В рассматриваемом мосте пробные и рабочие шаги совмещены, а выбор (проверка правильности) направления регулирования параметров осуществляется после того, как управляющие обмотки исполнительных двигателей обесточиваются, т. е. система регулирования является как бы разомкнутой. Если не учитывать насыщения двигателей, то величина шагов будет пропорциональна величине напряжения неравновесия мостовой цепи. Это достигается за счет постоянства такта работы мультивибратора и пропорциональности между напряжением на управляющих обмотках и напряжением неравновесия мостовой цепи. Такое построение системы регулирования экстремального моста позволяет получить высокую точность и малое время уравновешивания.

Полностью процесс ступенчатого уравновешивания моста на топографической диаграмме может быть представлен траекторией  $c-1-2\dots d$  (см. рис. 1). В начале уравновешивания может быть сделан один или два пробных шага, например  $c-1'$ , в результате которых мост удалится от состояния равновесия, но в дальнейшем пробные шаги совмещаются с рабочими, поэтому число коммутаций в цепи управления приблизительно равно числу рабочих шагов.

В мостах с уравновешиванием по методу Гаусса — Зайделя [1, 2] пробные шаги есть при каждом рабочем шаге (см. траекторию  $c-3-4-5\dots d$  на рис. 1). Общее число шагов при уравновешивании по методу Гаусса — Зайделя получается в два раза больше числа рабочих шагов. Следовательно, выигрыш в числе шагов, который теоретически дает метод Гаусса — Зайделя по сравнению с методом ступенчатого уравновешивания (траектория  $c-1-2\dots d$  и траектория  $c-3-4-5\dots d$ ), в реальных устройствах оказывается несущественным.

Из проведенного рассмотрения следует, что метод ступенчатого уравновешивания наиболее целесообразно применять при измерении равновеликих параметров комплексных сопротивлений с большими потерями, когда угол сходимости мостовой измерительной цепи существенно отличается от  $90^\circ$ .

Метод Гаусса — Зайделя целесообразно применить при угле сходимости, близком к  $90^\circ$ , а также при измерении резко различающихся по величине параметров комплексных сопротивлений. В последнем слу-

чае, который довольно часто встречается в практике измерений (измерение параметров конденсаторов и катушек индуктивности), имеется принципиальная возможность уменьшить время уравнивания за счет того, что процесс уравнивания всегда можно начинать с большего параметра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Б. Лейтман, Г. А. М. Али-Заде, Ю. В. Троицкий. Автоматический мост переменного тока. Авторское свидетельство № 177966. Бюллетень изобретений, 1966, № 2.
2. Ф. Б. Гриневич, М. А. Ахметьев. Автоматический экстремальный мост переменного тока с поочередным уравниванием. Авторское свидетельство № 187884. Бюллетень изобретений, 1966, № 21.
3. М. А. Ахметьев. О построении автоматических экстремальных мостов без модуляторов.— Тезисы докладов и сообщений конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1964.
4. Г. А. М. Али-Заде, Ю. В. Троицкий. Некоторые вопросы построения экстремальных мостов переменного тока.— Тезисы докладов и сообщений конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1964.

*Поступила в редакцию  
21 марта 1966 г.*