

С.Б. Ечмаев<sup>1</sup>, С.А. Жуков<sup>1</sup>, Н.Н. Жданов<sup>2</sup>, Л.Б. Машикин<sup>3</sup>

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия (1)  
Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, Россия (2)  
Институт структурной макрокинетики РАН, Черноголовка, Россия (3)

## ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРОВОЛОЧНЫХ НАГРЕВАТЕЛЯХ

### АННОТАЦИЯ

В настоящей работе приведены результаты работ по созданию экспериментальных установок для исследования тепловых и химических процессов, протекающих на тонких проволочных нагревателях, находящихся в жидкости. Обсуждаются особенности применения различных мостовых схем для управления температурой и электрической мощностью.

Метод нагретой проволоки широко применяется для исследования тепловых процессов. В этом методе помещенная в исследуемую среду металлическая проволока нагревается электрическим током. Температурная зависимость сопротивления проволоки из чистого металла хорошо известна и используется для контроля ее температуры. Измерение напряжения на проволочном датчике-нагревателе и текущего через него тока позволяет определить, выделяющуюся на нем, электрическую (тепловую) мощность. Использование тонких проволочных нагревателей с малой теплоемкостью и размерами позволяет приблизиться к модели точечного источника, температуру которого можно менять с большой точностью (доли градуса) и высокой (сотни градусов за микросекунду) скоростью.

Для точного измерения и контроля сопротивления (температуры) проволоки мы использовали различные варианты мостовой схемы включения, которая дает высокую точность и быстродействие. Так, созданная нами импульсная мостовая схема для измерения скорости растворения (коррозии) металлической проволоки, позволяет на проволоке диаметром 50 мкм измерять скорости растворения до 0.01 атомного слоя в секунду с погрешностью 10 процентов [1]. Особенность нашего подхода – применение автобалансирующихся мостовых схем для поддержания и регулирования заданного среднеинтегрального значения сопротивления датчика нагревателя. При этом напряжение питания моста изменяется схемой управления таким образом, чтобы, нагревая проволоку до заданного значения температуры (сопротивления), поддерживать баланс моста. Принципиально возможны два различных подхода. В первом используют дополнительный источник питания переменного напряжения, приложенного к мосту, который служит для определения величины омического разбаланса моста, получаемой после усиления и синхронного детектирования высокочастотного сигнала с диагонали моста. Преимущество

такого подхода в том, что с диагонали моста выделяется сигнал, приблизительно пропорциональный разбалансу сопротивления (температуры), а недостаток состоит в том, что частота тестирующего напряжения должна в несколько раз превышать верхнюю граничную частоту управляющей системы. По этой причине мостовая схема должна быть сбалансирована (скомпенсированы мнимые части импеданса всех компонентов моста) на более высокой частоте, чем максимальная частота управления, что представляет собой основную проблему. Кроме того, амплитуда тестирующего напряжения должна быть значительно меньше основного напряжения питания моста для того, чтобы не вносить заметный вклад в нагрев проволоки, что снижает чувствительность схемы, а частота должна быть значительно выше частоты отклика нагреваемой систем. В связи с этим, для получения максимальной скорости управления мы применяем другой подход, при котором напряжение питания моста используется и для измерения разбаланса. Указанный способ также имеет недостатки, которые, однако, могут быть преодолены нижеприведенными способами. Рассмотрим классический мост Уитстона (рис. 1).

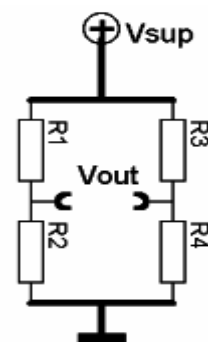


Рис. 1. Мост Уитстона

Очевидно, что величина сигнала, снимаемого с диагонали моста, равна произведению напряжения питания моста, умноженному на рациональную безразмерную функцию от величин сопротивлений элементов моста:

$$V_{out} = V_{sup} \cdot f(R_1, R_2, R_3, R_4). \quad (1)$$

Применяемые ранее стабилизаторы усиливали разбаланс по напряжению и на основании этой величины вырабатывали питание моста. Такой простой подход позволяет использовать только медленные относительно времени установления теплового равновесия системы управления. Так, для исследо-

вания химических реакций, инициированных нагретой проволокой, была применена модифицированная мостовая схема (Мост Машкинова [2]). Принцип действия демонстрируется на рис. 2 и 3.

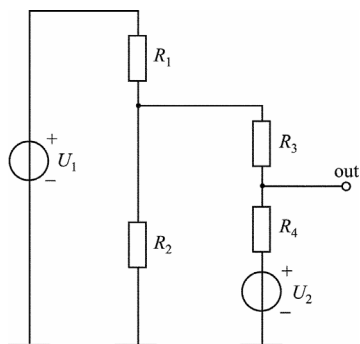


Рис. 2. Принципиальная схема моста Машкинова

Как известно, при усилении сигнала разбаланса моста Уитстона большую погрешность, особенно на высоких частотах, может вызывать синфазное напряжение, присутствующее на диагонали моста, которое на несколько порядков превышает дифференциальный сигнал разбаланса. Это требует особого внимания при конструировании предусилителя: применения операционных усилителей с высоким коэффициентом подавления синфазного сигнала и тщательной симметризации конструкции. Для обхода этих недостатков была предложена модифицированная мостовая схема (рис. 2), в которой дополнительный источник питания  $U_2 = -kU_1$  обратной полярности устраняет синфазный сигнал.

На рис. 3 приведена схемная реализация этого принципа. Простота конструкции позволяет изготовить такой регулятор в виде небольшого переносного блока. Однако такой регулятор не может обеспечить высокое быстродействие, необходимое для исследования быстрых динамических процессов при смене режимов кипения, быстрых изменениях заданной температуры или параметров теплоотдачи. Причина состоит в том, что, как следует из уравнения (1), управляющая система имеет информацию не о величине температурного разбаланса, а только

о величине его произведения на величину питающего напряжения, что при повышении полосы пропускания вызывает принципиальную неустойчивость. Рассмотрим состояние моста с небольшим разбалансом, требующим увеличения напряжения питания моста. Если система регулирования обладает высоким быстродействием, то она будет быстро (быстрее, чем время установления теплового равновесия) увеличивать питание моста, что, в соответствии с (1), приведет к еще большему электрическому разбалансу, вызывая еще большее увеличение питания. Таким образом, образуется цепь положительной обратной связи на высокой частоте, приводящая к возникновению автоколебаний. Кроме того, устойчивой точкой регулятора будет являться также состояние с нулевым напряжением питания. Для устранения этого недостатка нами была предложена и реализована модифицированная мостовая схема с блоком аналогового деления электрического сигнала разбаланса на напряжение питания моста (рис. 4) [3].

После блока деления в системе управления формируется сигнал, пропорциональный отклонению температуры от заданной, что позволяет управлять именно температурой нагревателя. Также впервые был применен блок аналогового извлечения корня перед выходным усилителем мощности. Этот блок устраняет нелинейность системы управления, связанную с квадратичной зависимостью электрической мощности от напряжения, давая “натуральный” закон управления, когда на вход системы регулирования поступает сигнал, пропорциональный невязке, а на выходе получается сигнал, пропорциональный мощности. Эта установка построена по блочно-модульному типу, что дает возможность легко менять отдельные узлы. Полученное качество управления может быть оценено из того факта, что в режиме интенсивного кипения среднеинтегральная температура проволоки удерживается регулятором в температурном коридоре 0.03 градуса. То есть, даже на доли микросекунды температура почти не отклоняется от заданной, хотя при этом мощность меняется весьма существенно.

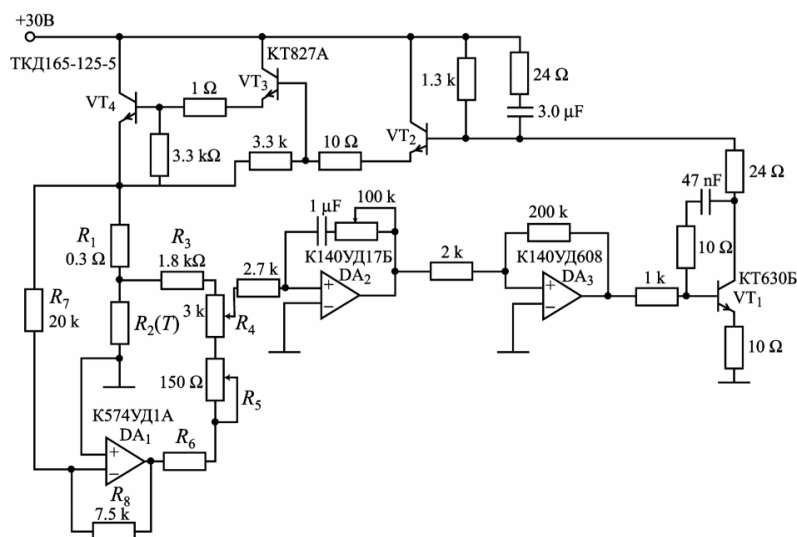


Рис. 3. Схема регулятора на основе моста Машкинова

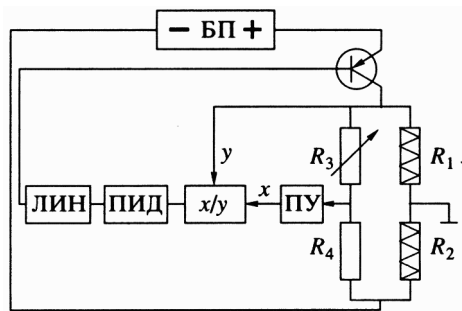


Рис. 4. Модифицированная мостовая схема

Принципиальные схемы некоторых узлов приведены ниже.

На рис. 5 приведена схема предусилителя. Он построен по классической схеме инструментального усилителя. В качестве второго каскада применен

дифференциальный усилитель с активной обратной связью. Приведенный ко входу шум около 2 нановольт/(Гц)<sup>1/2</sup>. Коэффициент усиления первого каскада выбран так, чтобы согласовать полосу частот и шум со вторым каскадом, в котором применен дифференциальный усилитель с активной обратной связью.

Полоса пропускания предусилителя около 100 МГц. Для уменьшения синфазных наводок печатная плата изготовлена максимально симметрично для сигнальных цепей. Испытания показали, что подавление синфазного сигнала таково, что только при подаче на входы меандра с амплитудой около 1 вольта он становится заметным на выходе на уровне шумов. На рис. 6 приведена схема аналогового делителя.

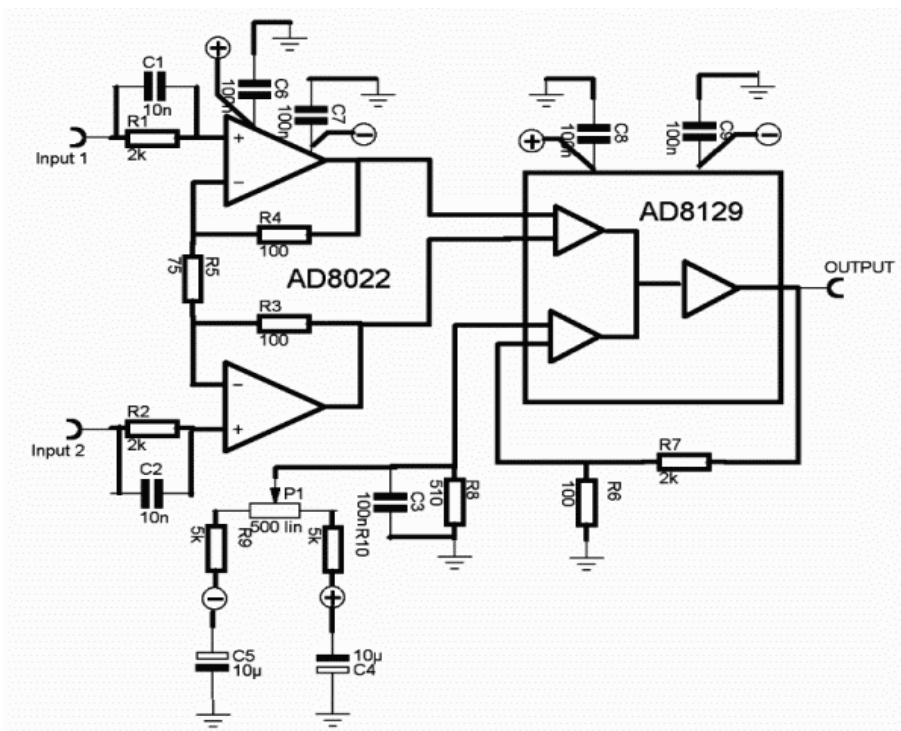


Рис. 5. Предварительный усилитель

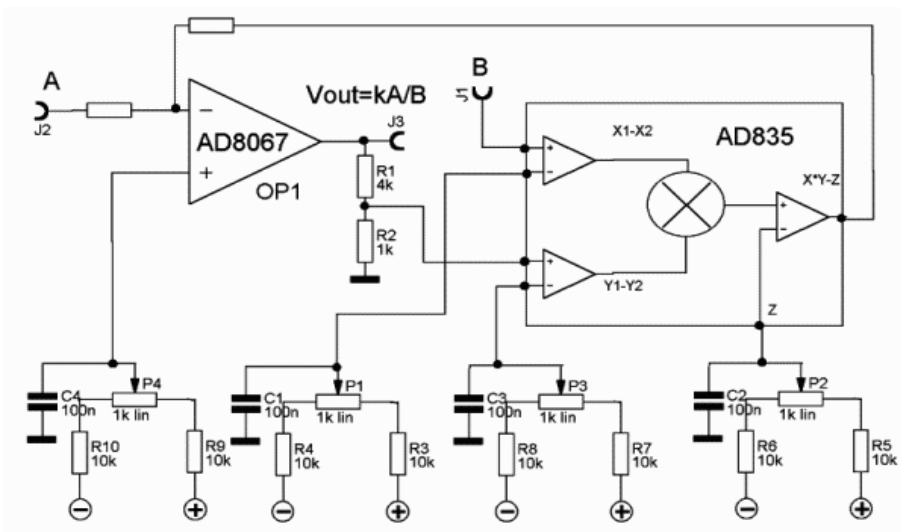


Рис. 6. Блок аналогового деления

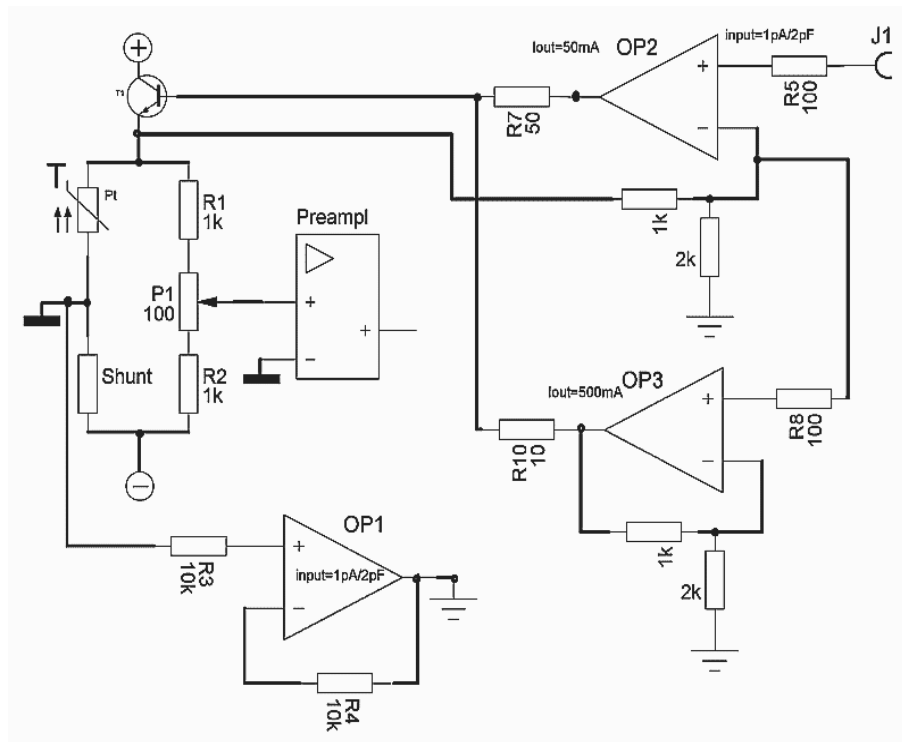


Рис. 7. Схема развязки

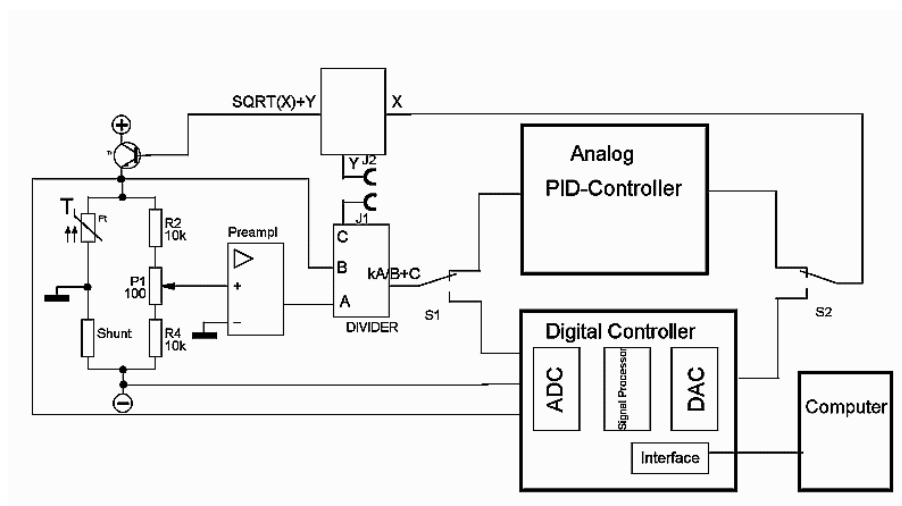


Рис. 8. Блок-схема аналого-цифрового контроллера

Были испытаны три различные схемы - последняя оказалась наилучшей. Образующийся после делителя сигнал (пропорциональный температурной невязке) поступает на блок пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора. На его суммирующий вход может подаваться дополнительный сигнал, имитирующий рассогласование температуры, а на выходной суммирующий усилитель также может быть подан сигнал для изменения выходной мощности. Далее сигнал поступает на схему извлечения квадратного корня и на схему развязки (рис. 7).

Возможен вариант управления мощностью, для чего используется аналоговый умножитель напряжения с проволочного датчика и напряжения с шунта, пропорционального току. Такой подход позволя-

ет управлять сопротивлением в широком диапазоне его изменений.

Выходной усилитель фактически построен по схеме стабилизатора напряжения на нагреваемой проволоке. Для того, чтобы ток управления не протекал через проволоку, применяется схема развязки (приведен один из вариантов) с отдельным питанием от силового блока. Выходной усилитель, построенный на базе 30 параллельно включенных транзисторов типа КТ972, подключается к рабочей ячейке через полосковый кабель для согласования импеданса. На схемах не приведены некоторые несущественные детали, служащие для защиты от аварийных режимов, ограничения уровней и т. п.

Дальнейшее развитие системы регулирования связано с применением цифровой системы на базе

цифрового сигнального процессора AD21992, которая включена параллельно аналоговому ПИД-регулятору и может осуществлять управление по более сложным алгоритмам, чем аналоговые системы (рис. 8).

Особенность цифровых сигнальных процессоров в том, что за один машинный такт (6 наносекунд) может вычисляться один элемент скалярного произведения – умножение двух чисел и аккумулярование результата. В микросхеме AD21992 интегрирован 8-канальный 14-разрядный аналого-цифровой преобразователь, работающий со скоростью 20 миллионов измерений в секунду. Устройство выборки хранения обеспечивает одновременность измерений по двум каналам порядка нескольких наносекунд. Поэтому выходной сигнал цифрового управления, построенного по типу цифрового фильтра, может быть вычислен в промежутке между двумя последовательными отсчетами АЦП для фильтра 7-го порядка. Применение цифрового управления открывает огромные возможности для различных исследо-

ваний тепловых процессов. В настоящее время эта установка находится в стадии освоения.

Работа выполняется по программе фундаментальных исследований РАН «Устойчивость фазовых состояний и критические режимы тепломассопереноса». Государственный контракт № 10002-251. ЩЭММПУ-07/067-131/050504-227.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нифонтова Г.А., Ермаев С.Б., Сикоренко Ю.Б., Лаврентьев И.П.** Автоматизированная установка для исследования кинетики растворения металлов в жидкостях резистометрическим методом // Журнал физической химии. 1998. Т. 72. N 1. С. 157–161.
2. **Патент РФ.** Термоанемометр постоянной температуры / Л.Б. Машкинов. № 25. 1999.
3. **Zhukov S.A., Afanas'ev S.Yu., Ezhmaev S.B.** Concerning the magnitude of maximum heat flux and the mechanisms of superintensive bubble boiling // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2003. № 46. P. 3411–3427.