

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГУЛЯТОРА

В.П.Войтенко

Черниговский государственный технологический университет

Украина, 14027, г. Чернигов, ул. Шевченко, 95, ЧГТУ, кафедра промышленной электроники

Тел. (04622) 316-96-152, E-mail: vvp@inel.stu.cn.ua

**Annotation** – The quasi-optimal industrial regulators with automatic parametric identification of the controlled object are experimentally investigated. Such regulators allow receiving of required accuracy of controlled parameter establishing without overshoot and practically at minimum time. Besides it is possible to find automatically the regulator coefficients depending on the used controlled object parameters.

**Key words** – optimal control, parametric identification, power converter.

## ВВЕДЕНИЕ

В [1] впервые предложена концепция построения квазиоптимальных промышленных регуляторов с автоматической параметрической идентификацией объекта управления. Такие регуляторы позволяют получить требуемую точность установления регулируемого параметра без перерегулирования практически за минимальное время. Представленная структура иерархической системы управления для промышленного регулятора состоит из двух подсистем: автоматического позиционирования и автоматического слежения. Предложенный подход к параметрической идентификации объекта управления базируется на формировании тестового воздействия в виде импульса максимальной мощности определенной длительности.

В [2] приведена Simulink-модель реального объекта управления, а также определена связь между ШИМ и АИМ методами регулирования выходного напряжения силового преобразователя. Методом моделирования показано, что в квазиоптимальном регуляторе использование широтно-импульсной модуляции выходного напряжения силового преобразователя, коэффициент заполнения которого линейно связан с амплитудой выходного напряжения в классическом оптимальном регуляторе, позволяет получить хорошие динамические показатели системы.

Полученные теоретические результаты нуждаются в экспериментальной проверке. Данная статья посвящена практической реализации предлагаемых регуляторов и уточнению алгоритмов их работы с реальным объектом управления и при учете тех факторов, которые не могли быть использованы на теоретическом этапе исследования.

## СТЕНД ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

При построении аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего разработку, отладку и экспериментальную проверку алгоритмов функционирования квазиоптимальных регуляторов возникает ряд взаимно-противоречивых требований. С одной стороны, необходимо обеспечить работу тестируемого объекта управления, по возможности, в тех же режимах, что и в реальных производственных условиях. С другой стороны, следует максимально автоматизировать

процедуру испытаний, документирования и модификации рабочего алгоритма. Исходя из сформулированных выше требований и построен стенд для экспериментальных исследований квазиоптимальных регуляторов, структура которого представлена на Рис. 1.

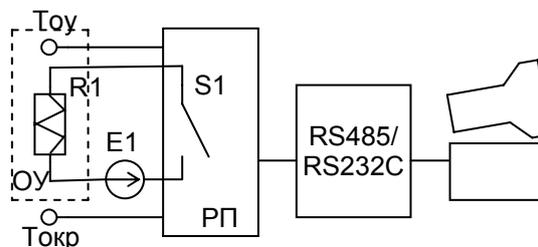


Рис. 1

Взаимодействие с объектом управления ОУ, который в данном случае представляет собой электронагреватель R1, осуществляется через регулятор-прототип РП. РП содержит два канала измерения температуры: собственно объекта Тоу и окружающей среды Токр. Оба канала снабжены соответствующими датчиками. Питание электронагревателя осуществляется от стабилизированного источника питания E1 постоянного тока, что позволяет устранить влияние питающей сети на результаты экспериментов. Так же, как и реальный промышленный регулятор, РП построен на базе микроконтроллера. Резидентное программное обеспечение РП, однако, максимально упрощено и ориентировано на поддержку интерфейса между ОУ и персональным компьютером.

Взаимодействие с оператором (ввод рабочего алгоритма, выдача результатов эксперимента) производится с помощью персонального компьютера. Адаптация интерфейса промышленного регулятора RS485 в обычный последовательный интерфейс связи RS232C осуществляется с помощью моста-преобразователя.

Алгоритм квазиоптимального управления, подготовленный в среде программирования C++, представляет собой один из модулей комплексной программы коммуникации с РП и визуализации результатов эксперимента. Таким образом, алгоритм замыкания ключа S1 в стенде, по существу, задает персональный компьютер. Это определяет чрезвычайно высокую гибкость процесса отладки. Ограничения по быстродействию определяются, в основном, интерфейсом.

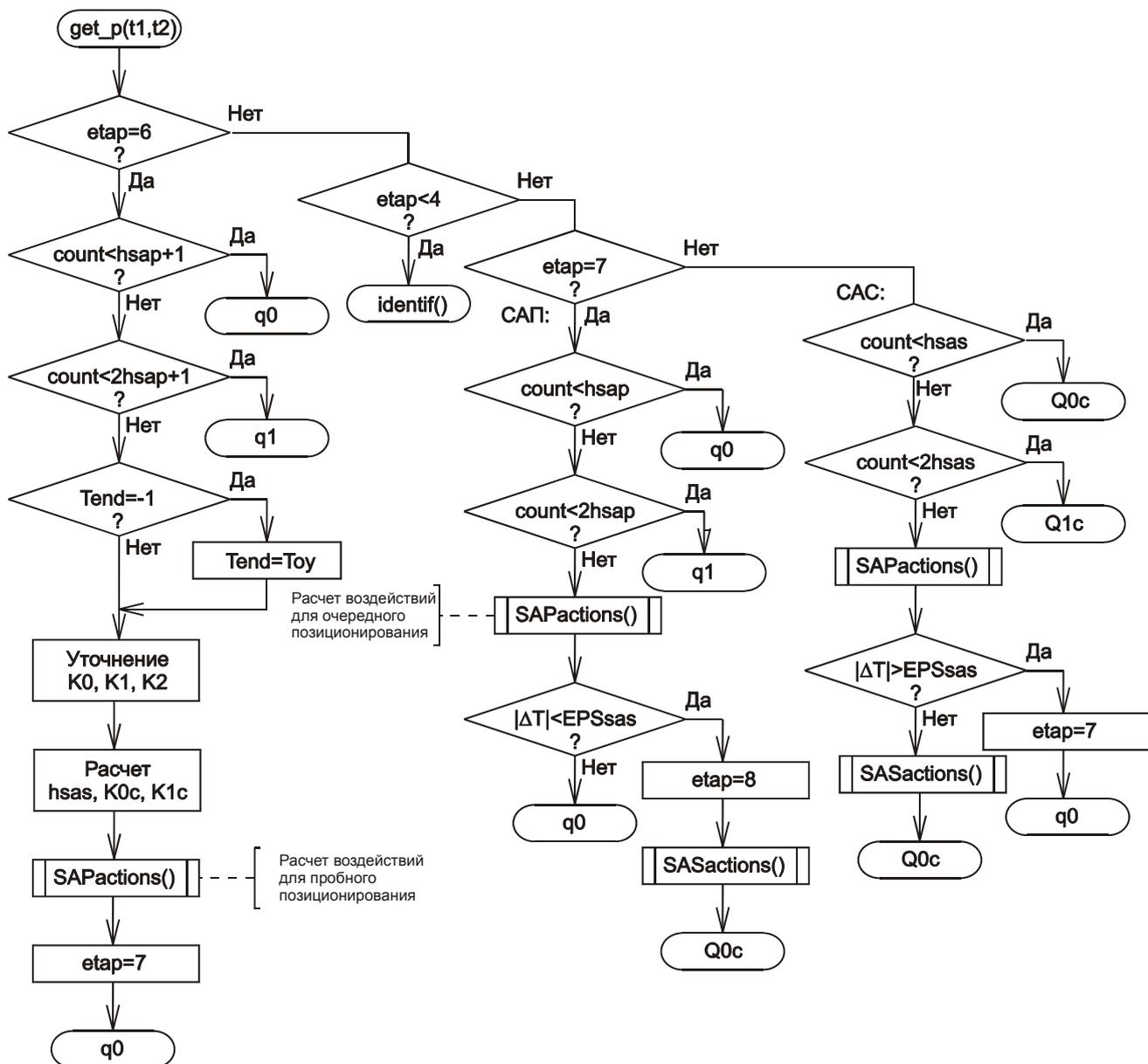


Рис. 2

Отработанный алгоритм на уровне исходного текста на языке C практически без доработок далее используется для загрузки резидентной памяти собственно микроконтроллера промышленного регулятора.

### ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОДУЛЯ

Общий алгоритм функционирования модуля *Unit\_control.cpp*, отвечающего за формирование управляющих воздействий в стенде для экспериментальных исследований квазиоптимальных регуляторов, представлен на Рис. 2.

Модуль запускается регулярно с шагом дискретизации, задаваемым программным таймером. Параметрами модуля является температура объекта управления  $t1$  и температура окружающей среды  $t2$ . Сигналы с соответствующих датчиков преобразуются в АЦП микроконтроллера ПР в код, который посредством последовательного интерфейса передается в ПЭВМ. Параметром, который возвращает модуль внешней

вызывающей программе, является скважность управления.

Логика работы модуля формирования управляющих воздействий *Unit\_control.cpp* построена на анализе флага этапа работы квазиоптимального регулятора *etap*. Наглядное представление этих этапов иллюстрируется временными диаграммами, приведенными на Рис. 3. Здесь показаны скважность управления ( $Q$ ) и температура ОУ ( $T$ ).

Рабочими этапами квазиоптимального регулятора являются 7-ой (позиционирование) и 8-ой (слежение). Эти этапы образуют нормальный цикл работы регулятора: постоянное отслеживание температуры задания и переход к позиционированию в случае изменения задания или большого возмущения, вызванного любым дестабилизирующим фактором. Все остальные этапы посвящены идентификации ОУ и могут отсутствовать при повторных запусках регулятора совместно с теми же ОУ и заданием. В этом случае параметры регулирования извлекаются из базы данных регулятора.

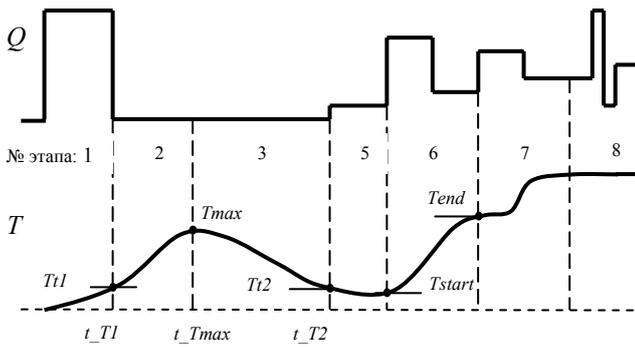


Рис. 3

Этапы идентификации алгоритма работы квазиоптимального регулятора представлены на Рис. 4.

1 этап – тестирование ОУ. Вычисляется температура уставки  $T_{t1}$ . Пока температура объекта не превышает уставки, выводится предельно-допустимая для данного ОУ мощность путем формирования максимальной скважности регулирования  $Q_{max}$ . Как только температура ОУ превысит уставку, текущий момент времени  $t_{T1}$  (т.е. – длительность импульса) фиксируется, а флаг этапа принимает значение 2.

2 этап – свободный выбег температуры ОУ до максимума. На этом этапе с ОУ воздействие снимается, т.е. скважность регулирования равняется 0. Кроме того, вычисляется транспортное запаздывание ОУ с помощью процедуры  $TAU_$ , а также фиксируется текущее время и температура ОУ в переменных  $t_{Tmax}$  и  $T_{max}$ . При каждом последующем входе в процедуру идентификации вновь измеренная температура ОУ сравнивается с предыдущим значением  $T_{max}$ . Как только начинается спад температуры ОУ (т.е. максимум достигнут), производится вычисление температуры оценивания  $T_{t2}$ , а флаг этапа принимает значение 3.

3 этап – естественное охлаждение ОУ. Скважность регулирования сохраняется на нулевом уровне до тех пор, пока температура ОУ превышает температуру оценивания  $T_{t2}$ . Момент достижения этой температуры  $t_{Tt2}$  (т.е. время оценивания) фиксируется, после чего флаг этапа принимает значение 4 и запускается процедура оценки параметров ОУ  $estimation()$ .

4 этап – оценка параметров ОУ. Выполняется по линейному алгоритму. При этом находится постоянная времени ОУ  $T_2$ , максимальное значение коэффициента передачи регулятора на  $\theta$ -вом шаге  $K0_{max}$ , вычисляется интегральный коэффициент  $K2_0$ , выбирается длительность шага позиционирования  $h_{sap}$  и, наконец, рассчитываются оценки коэффициентов регулирования  $K0_0$  и  $K1_0$ . Далее инициализируется счетчик периодов ШИМ  $count$  для реализации торможения и вычисляется значение скважности торможения ОУ  $q_0$ .

5 этап – торможение ОУ. Тормозящее воздействие, скважность которого вычислена на предыдущем этапе, выдается на ОУ в течение длительности одного шага позиционирования, т.е. до тех пор, пока счетчик периодов ШИМ  $count$  не достигнет значения  $h_{sap}$ . Кроме того, на этапе торможения ОУ производится расчет воздействий для пробного позиционирования с помощью процедуры  $SAPactions()$ . Для того, чтобы избежать возможного перерегулирования, в качестве температуры задания здесь используется значение, не-

сколько меньше, чем заданная температура позиционирования. В качестве «истинных» коэффициентов регулирования  $K0$  и  $K1$  принимаются оценочные значения  $K0_0$  и  $K1_0$ . С целью последующей корректировки коэффициентов регулятора фиксируется начальная температура пробного позиционирования  $T_{start}$ . После этого флаг этапа принимает значение 6.

В процедуре  $SAPactions()$ , используемой для расчета воздействий для позиционирования, последовательно вычисляется скважность перегрева  $Q_{n0}$ , ошибка по температуре  $\Delta T$  и скважность регулирования на нулевом шаге  $q_0$ . Кроме того, инициализируется скорректированная ошибка по температуре  $\Delta Tk$ .

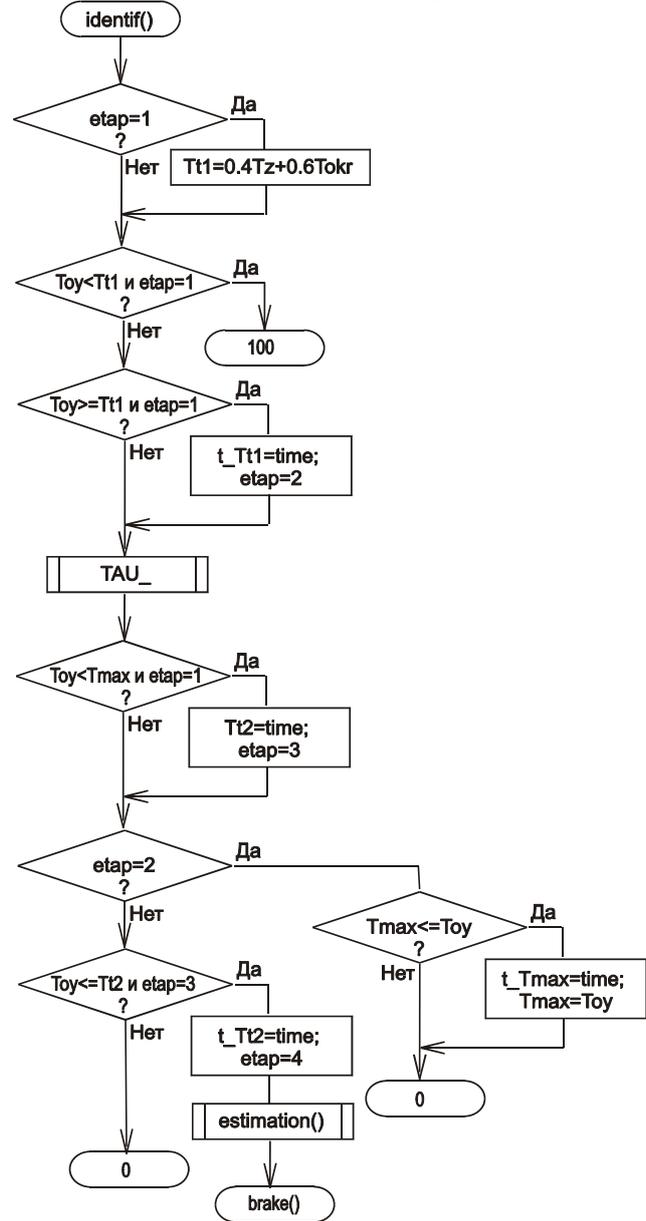


Рис. 4

Если рассчитанное значение  $q_0$  неотрицательное, то проверяется условие недопущения выдачи воздействия, превышающего  $Q_{max}$ . При нарушении этого условия выполняется ограничение воздействия на нулевом шаге позиционирования и рассчитывается скорректированная ошибка по температуре. Аналогично

поступаем и в случае первоначально отрицательного значения  $q_0$ , которое подлежит ограничению на минимально допустимом уровне  $\theta$ . Далее производится расчет скважности регулирования на первом шаге  $q_1$  и, в случае отрицательного результата, корректируется не только ошибка по температуре, но и  $q_0$ . В заключение процедуры инициализируется счетчик периодов ШИМ  $count$ , т.е. задаются исходные условия для  $\theta$ -го шага позиционирования.

**6 этап** – пробное позиционирование ОУ. Если счетчик периодов ШИМ  $count$  меньше количества этих периодов на шаге позиционирования  $h_{sap}$ , это означает, что продолжается 1-й шаг. При этом выводится рассчитанная ранее с помощью процедуры  $SAPactions()$  для этого шага скважность позиционирования  $q_0$ . Аналогично выводится скважность для 2-го шага позиционирования  $q_1$ . Сразу же по завершении фиксируется температура ОУ  $T_{end}$ , которая далее используется для уточнения коэффициентов регулятора по результатам пробного позиционирования. По уточненным параметрам позиционирования рассчитываются шаг, коэффициенты слежения, а также управляющие воздействия для первого позиционирования. В завершение шестого этапа переменной  $etap$  присваивается значение 7, что означает переход к позиционированию ОУ.

**7 этап** – позиционирование ОУ. По завершении выдачи позиционирующих воздействий аналогичным этапу 6 образом производится расчет ошибки установления и скважности для последующих этапов работы САП с помощью процедуры  $SAPactions()$ . Если модуль ошибки превышает зону захвата САС  $EPS_{sas1}$ , производится выдача воздействия  $q_0$ , а работа САП повторяется. В противном случае переменной  $etap$  присваивается значение 8 и рассчитывается скважность для последующих этапов работы САС с помощью процедуры  $SASactions()$ . Далее происходит выдача воздействия для 0-го шага САС  $Q_{0c}$  и переход к слежению.

В процедуре  $SASactions()$ , используемой для расчета воздействий для слежения, вычисляется скважность регулирования на нулевом шаге слежения  $Q_{0c}$ . При этом используются полученные ранее с помощью  $SAPactions()$  скважность перегрева  $Q_{n0}$ , а также ошибка по температуре  $\Delta T$ , которая инициализирует скорректированную ошибку по температуре  $\Delta Tk$ .

Если рассчитанное значение  $Q_{0c}$  неотрицательное, то проверяется условие недопущения выдачи воздействия, превышающего  $Q_{max}$ . При нарушении этого условия воздействие на  $\theta$ -вом шаге слежения ограничивается и рассчитывается скорректированная ошибка по температуре. Аналогично поступаем и в случае первоначально отрицательного значения  $Q_{0c}$ . Далее производится расчет скважности слежения на первом шаге  $Q_{1c}$  и, в случае отрицательного результата, корректируется не только ошибка по температуре, но и  $Q_{0c}$ .

После этого вычисляется значение интегральной составляющей следящего воздействия  $Q_{nc}$ . В заключение процедуры производится проверка попадания ОУ в зону нечувствительности. Если модуль текущей ошибки достаточно мал, инициализируется счетчик периодов ШИМ  $count$  таким образом, что далее выполняется только один шаг слежения. При этом уровень воздействия равен  $Q_{nc}$ .

**8 этап** – слежение за температурой ОУ (Рис. 2). Вывод следящих воздействий  $Q_{0c}$  и  $Q_{1c}$  на двух шагах слежения с количеством периодов ШИМ  $h_{sas}$  каждый производится идентично 7 этапу. Далее производится расчет ошибки установления и скважности для возможных этапов работы САП с помощью процедуры  $SAPactions()$ . Если модуль ошибки превышает зону удержания САС  $EPS_{sas2}$ , то переменной  $etap$  присваивается значение 7 и производится выдача воздействия  $q_0$ , т.е. происходит возврат к работе САП. В противном случае выполняется расчет скважности для последующих этапов работы САС с помощью процедуры  $SASactions()$  и производится выдача воздействия для 1-го шага САС  $Q_{0c}$ . Таким образом, при отсутствии изменения на задание, а также больших возмущений регулируемого параметра, цикл слежения может продолжаться вплоть до выключения регулятора.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис. 5 приведены экспериментально полученные с помощью описанного стенда совмещенные временные диаграммы коэффициента заполнения и температуры в процессе идентификации определенного реального объекта управления.

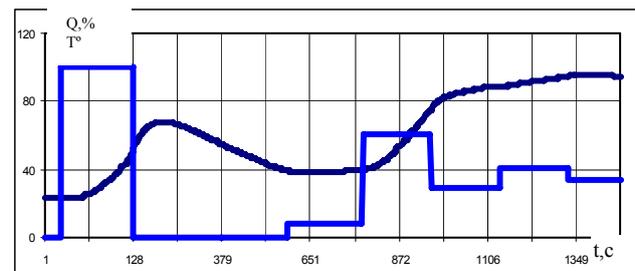


Рис. 5

Полученные результаты свидетельствуют о правильности основных теоретических посылок, лежащих в основе построения квазиоптимальных промышленных регуляторов с автоматической параметрической идентификацией [1, 2].

## ВЫВОДЫ

1. Предложенный алгоритм квазиоптимального управления проверен и уточнен с помощью экспериментального стенда на реальном объекте.

2. Экспериментальные данные убедительно подтверждают правильность теоретических предпосылок, лежащих в основе построения квазиоптимальных промышленных регуляторов с автоматической параметрической идентификацией.

[1] В.П.Войтенко. Квазиоптимальные промышленные регуляторы с автоматической параметрической идентификацией// Технічна електродинаміка, тем. випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – Київ, 2004, ч. 3. – С. 85 – 90.

[2] В.П.Войтенко. Модуляція вихідної напруги силового перетворювача в квазіоптимальному промисловому регуляторі// Вісн. Чернігівського державного технологічного університету, 2005. – № 21. – С. 130 – 134.

